

Технологии групповой микрообработки для производства чувствительных элементов инерциальных МЭМС датчиков

О. С. Гусева, *shetakova.kd@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Д. В. Козлов, к. т. н., *kozlov.dv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. С. Корпухин, к. т. н., *korpukhin.as@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

И. П. Смирнов, *smirnov.ip@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. С. Харламов, *kharlamov.ms@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

К. Д. Шестакова, *shetakova.kd@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе представлены различные варианты инерциальных МЭМС датчиков тактического и навигационного класса точности, применяемые в отечественной аэрокосмической отрасли. В центре микроэлектроники АО «Российские космические системы» на данный момент ведется ряд работ по разработке технологий групповой микрообработки кварцевых и кремниевых чувствительных элементов таких датчиков и их внедрению в серийное производство. Основной задачей исследования при этом является увеличение точности и повторяемости геометрии упругих подвесов чувствительных элементов МЭМС датчиков. Освоенные технологии позволили: обеспечить формирование кремниевых упругих элементов МЭМС акселерометров и гироскопов с точностью объемных размеров до 1 мкм, увеличить точность микрообработки кварцевых чувствительных элементов в 5 раз по сравнению с традиционной технологией. В настоящее время большинство освоенных технологий реализовано в серийном производстве чувствительных элементов инерциальных МЭМС датчиков и используется в бортовых системах аэрокосмической техники.

Ключевые слова: акселерометр, гироскоп, инерциальный датчик, кварц, кремний, технология

Group Micromachining Technologies for the Production of Sensitive Elements of Inertial MEMS Sensors

O. S. Guseva, *shestakova.kd@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

D. V. Kozlov, *Cand. Sci. (Engineering), kozlov.dv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. S. Korpukhin, *Cand. Sci. (Engineering), korpukhin.as@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

I. P. Smirnov, *smirnov.ip@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. S. Kharlamov, *kharlamov.ms@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

K. D. Shestakova, *shestakova.kd@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents various variants of inertial MEMS sensors of tactical and navigation accuracy class used in the Russian aerospace industry. Currently, the microelectronics center of Joint Stock Company "Russian Space Systems" is carrying out a number of works on the development of technologies for group microprocessing of quartz and silicon sensitive elements for such sensors and their introduction into mass production. In this case, the main task of the study is to increase the accuracy and repeatability of the geometry of elastic suspensions of MEMS sensors. The developed technologies made it possible to ensure the formation of silicon elastic elements of MEMS accelerometers and gyroscopes with an accuracy of volumetric dimensions up to 1 micron; to increase the precision of micromachining of quartz sensitive elements by a factor of 5 in comparison with traditional technology. Currently, most of the mastered technologies are implemented in the serial production of sensitive elements of inertial MEMS sensors and are used in onboard systems of aerospace devices and vehicles.

Keywords: accelerometer, gyroscope, inertial sensor, quartz, silicon, technology

Введение

Малогобаритные высокоточные инерциальные датчики на основе микромеханических чувствительных элементов (ЧЭ) получили широкое распространение в ракетно-космической технике в системах управления и автономной навигации средств выведения, на орбитальных аппаратах, межпланетных и спускаемых модулях [1]. Потенциал и перспективы компактных бесплатформенных инерциальных навигационных систем, а также отдельных акселерометров и гироскопов обусловлен ужесточением требований к массогабаритным характеристикам изделий ракетно-космической техники (появление нано- и пикоспутников, сверхлегких ракет-носителей) и повышением их автономности, в том числе элементов космических транспортных систем многократного использования. Помимо ракетно-космической отрасли, микромеханические акселерометры и гироскопы имеют обширное применение в различных коммерческих сферах, например при бурении нефтяных скважин, в транспорте, авиации и различных портативных устройствах.

Основными преимуществами микромеханических инерциальных датчиков является возможность их группового изготовления благодаря использованию специализированных технологий микрообработки ЧЭ, что многократно снижает трудоемкость производства, а также минимизирует сборочно-монтажные операции вплоть до реализации изделий типа «система-на-кристалле» [2], что, в свою очередь, ведет к уменьшению себестоимости и повышению надежности. В технологии используются процессы традиционного микроэлектронного производства: создание тонкопленочных диэлектрических и проводящих слоев, фотолитография, жидкостное и плазменное химическое селективное травление и др. [3].

В России на данный момент при высоком спросе на подобные датчики наблюдаются трудности при разработке новых технологий изготовления и дефицит серийных производителей ЧЭ. Кварцевые маятники изготавливают по индивидуальной пикеиновой технологии [4] следующие фирмы: АО «Серпуховской завод «Металлист»», АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», АО «Раменский приборостроительный

завод», ФГУП «НПЦАП»–«ПО «Корпус»» г. Саратова. Проблема их изготовления заключается в том, что каждый ЧЭ имеет свои геометрические размеры, требует индивидуальной доработки и доведения до требуемых размеров, что является очень трудоемким процессом. В свою очередь, АО «Российские космические системы» занимается разработкой групповой технологии, где на одной пластине изготавливаются ЧЭ, имеющие идентичные геометрические размеры. Кремниевые ЧЭ изготавливаются в АО «НИИ ФИ» г. Пензы, АО «ПН ППК» г. Перми, АНПП «ТЕМП АВИА» г. Арзамаса, АО «Российские космические системы» по групповым технологиям микрообработки.

К основным сложностям технологии, с которыми сталкиваются разработчики таких ЧЭ, относятся формирование мало напряженных микромеханических объемных структур в кристалле с малыми геометрическими размерами как в плоскости, так и по толщине (порядка нескольких мкм), низкой погрешностью (менее 1 мкм) и масштабирование этих требований на серийные объемы производства с высокой повторяемостью и воспроизводимостью. Ключевой целью данной работы является разработка новых методов микрообработки для повышения точности и повторяемости геометрических размеров объемных микроструктур с субмикронной погрешностью в различных конструктивно-технологических вариантах ЧЭ инерциальных датчиков.

В типовом ЧЭ инерциальной системы имеется подвижная инерционная масса, подвешенная с помощью упругих элементов на неподвижной опоре, жестко связанной с корпусом прибора. Отклонение инерционной массы из состояния равновесия при внешнем воздействии (инерционная сила в акселерометре или сила Кориолиса в гироскопе) регистрируется переменной емкостью, пьезоприводом или магнитоэлектрической системой в зависимости от конструктивно-технологического варианта. В большинстве прецизионных инерциальных датчиков имеется система отрицательной обратной связи (магнитоэлектрическая, пьезоэлектрическая или электростатическая), возвращающая инерционную массу в состояние равновесия. В вариантах ЧЭ инерциальных систем помимо разных материалов и систем первичных и вторичных преоб-

разователей используются различные типы движения и деформации (кручение, линейное смещение, колебания, стоячие волны), и, соответственно, отличающиеся упругие элементы (торсионы, балки, меандры, ламели). Точность формирования именно этих элементов наиболее сильно сказывается на погрешностях выходного сигнала инерциальных датчиков [5].

Многообразие конструкций и материалов таких ЧЭ предполагает необходимость создания целого набора методов их изготовления. В работе представлены ЧЭ, при изготовлении которых использовались процессы микрообработки, включающие формирование тонких проводящих и диэлектрических слоев, фотолитография, жидкостное химическое, электрохимическое и плазменное травление через селективный маскирующий рисунок. Материалами для ЧЭ служили кремниевые и кварцевые пластины, выполненные с более высоким качеством (равномерность по толщине пластины приблизительно ± 1 мкм, шероховатость поверхности — среднее арифметическое отклонение профиля пластины имели значения $Ra < 1$ нм), чем указано в технических условиях на эти материалы, что необходимо для изготовления МЭМС ЧЭ. Качество пластин существенно влияло на выход годных изделий.

Перед началом изготовления изделий проводился входной контроль пластин на соответствие техническим требованиям. Выходной контроль получаемых изделий гарантировал качество изготовленной продукции.

Критериями отбраковки ЧЭ являлись дефекты типа сколов, каверн, царапин и других повреждений микроструктуры ЧЭ, а также отклонение ключевых размеров выше критических значений.

Контроль и измерение геометрических размеров и получаемых микроструктур проводился методами оптической и электронной микроскопии на микроскопах типа Axio Imager фирмы Carl Zeiss, типа Hawk фирмы Vision Engineering, обеспечивающих измерения с погрешностью ± 1 мкм, и типа Jeol с погрешностью $+10$ нм, а также конфокальной и контактной профилометрии на оптическом профилометре типа Sensofar с погрешностью измерений ± 10 нм и стилусном профилографе типа AlphaStep D100, обеспечивающем измерения с погрешностью $+5$ нм.

Далее рассмотрены различные примеры ЧЭ наиболее востребованных инерциальных датчиков и приведены особенности технологии их производства.

Акселерометр с кварцевым маятниковым узлом

Акселерометр типа Q-flex обладает высокими точностными характеристиками благодаря низким значениям нулевого сигнала, высокой стабильности и чувствительности. Это обусловлено во многом выбором кварцевого стекла в качестве конструкционного материала для маятникового узла (МУ), а именно низким модулем Юнга кварца по сравнению с кремнием и близким значением температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с суперинваром — материалом магнитной системы акселерометра. ЧЭ Q-flex акселерометра является структура, представленная на рис. 1.

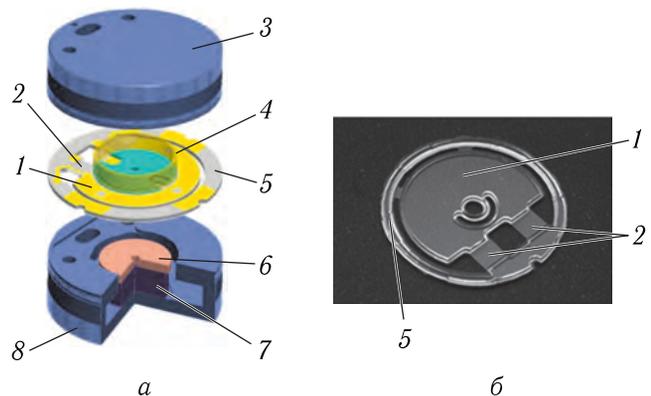


Рис. 1. Схема ЧЭ компенсационного акселерометра типа Q-flex (а) [6] и образец кварцевого МУ, полученного методами жидкостного и плазменного травления (б): 1 — лопасть маятника; 2 — перемычки упругого подвеса 3; 4 — катушка датчика момента; 5 — кольцо с установочными платиками; 6 — полюсный наконечник; 7 — постоянный магнит; 8 — магнитная система

В настоящее время для акселерометров данного типа актуальна проблема низкой повторяемости температурной стабильности между различными приборами в партии при серийном производстве, что преимущественно связано с низкой точностью традиционных методов индивидуальной

ручной микрообработки кварца с травлением через пищевую маску [4].

Исследование процессов микрообработки кварца позволили реализовать технологию группового производства кварцевых МУ в пластинах диаметром 100 мм.

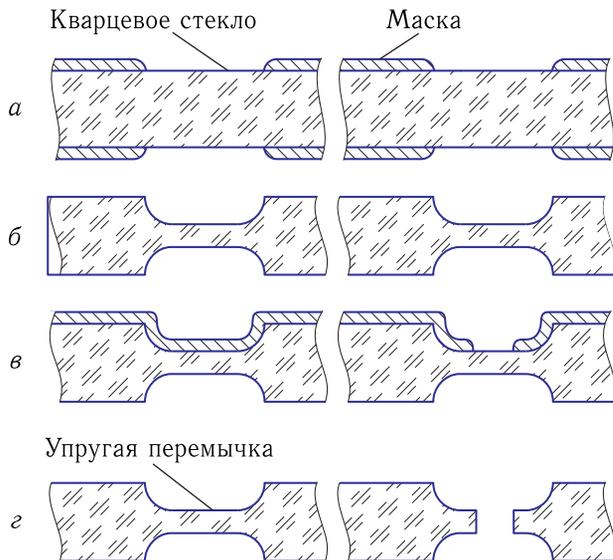


Рис. 2. Последовательность технологических операций изготовления кварцевых МУ: а, б — формирование глубинного профиля; в, г — формирование сквозных отверстий

На рис. 2 представлена последовательность технологических операций при изготовлении кварцевых ЧЭ [7].

Формирование структуры МУ проводится с использованием двустороннего жидкостного химического травления (ЖХТ) кварца и анизотропного реактивного ионного травления, которое служит для получения упругих перемычек и сквозных отверстий. Все процессы травления проводятся через селективную маску, сформированную методом фотолитографии и ЖХТ. Ключевыми задачами при разработке данной технологии стали выбор материала кварцевой заготовки (плавленый кварц КУ-1 или его зарубежный аналог) без внутренних дефектов — пузырей, свилей и т. д., не видимых при визуальном осмотре, выбор производителя, нарезающего и полирующего пластины без поверхностных глубинных царапин с равномерностью по толщине ± 1 мкм (общее изменение толщины ТТВ), крайне необходимой при групповом глубин-

ном жидкостном травлении, определение материала покрытия для жидкостного двустороннего травления, обеспечивающего получение бездефектной и мало напряженной маски, а также исследование и отработка процесса заключительного сквозного реактивного ионного травления кварца. В работе [8] описаны ключевые параметры режима травления, а также исследования и сравнения различных металлических маскирующих материалов.

Таким образом, разработанная технология позволила: достичь точности формирования топологических размеров кварцевого МУ около 10 мкм (при относительном отклонении менее 1 %) за счет изотропного ЖХТ кварца через фотолитографическую маску; исключить возникновение остаточных напряжений, сколов и острых кромок, характерных для традиционных методов лазерной или механической резки благодаря применению сквозного реактивного ионного травления кварца; сократить трудоемкость изготовления до 2,5 раз по сравнению с традиционными методами микрообработки за счет групповой технологии формирования МУ в пластине. Полученный выход годных составил величину приблизительно 80 % (по результатам измерения 30 пластин диаметром 100 мм с количеством ЧЭ на пластине от 9 до 15 шт.).

Акселерометр с кремниевыми балочными подвесами

Акселерометры, в составе ЧЭ которых используется кремниевый МУ, имеют более низкие показатели точности, чем кварцевые, однако они также получили широкое распространение благодаря меньшей себестоимости, которая обусловлена прежде всего возможностью применения стандартных групповых технологических процессов микрообработки кремниевых заготовок в виде пластин и высокой степенью повторяемости изделий. Ключевым преимуществом кремния является применения жидкостного травления с анизотропией в зависимости от индексов Миллера кристаллической решетки, что позволяет формировать необходимые профили травления, трудно достижимые другими методами. Один из вариантов ЧЭ компенсационного акселерометра с кремниевым МУ представлен на рис. 3.

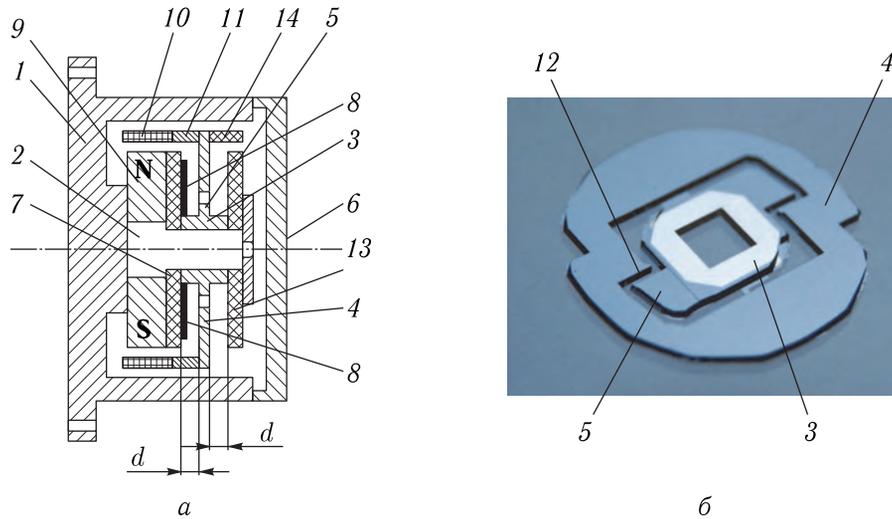


Рис. 3. Структурная схема ЧЭ компенсационного акселерометра с кремниевым МУ (а) и образец МУ (б): 1 — корпус; 2 — центрирующая стойка; 3 — кремниевый маятниковый узел; 4, 5 — подвижная и неподвижная части маятникового узла; 6 — крышка корпуса; 7, 13 — пластины; 8 — обкладки конденсатора; 9 — постоянный магнит; 10 — катушка индуктивности; 11 — грузы; 12 — балочные упругие подвесы; 14 — дополнительная масса [9]

Кремниевый МУ (3) закреплен центральной неподвижной частью (5) в корпусе (1), которая балочными упругими подвесами (12) связана с внешней подвижной частью (4).

Ключевым требованием к технологии изготовления является минимальное отклонение толщины формируемой балки упругого подвеса по пластине. На рис. 4 изображена разработанная последовательность технологических операций изготовления кремниевого МУ с балочным упругим подвесом.

Согласно схеме на первом этапе с обратной стороны пластины (1) формируется *p-n* переход (2) методом ионной имплантации и разгонки имплантируемой примеси на необходимую глубину, соответствующую толщине формируемого упругого подвеса. На следующем этапе формируется маскирующий слой (3) и рисунок маски с лицевой стороны для длительного жидкостного травления в растворе щелочи, после чего на обратной стороне пластины также формируется рисунок ранее

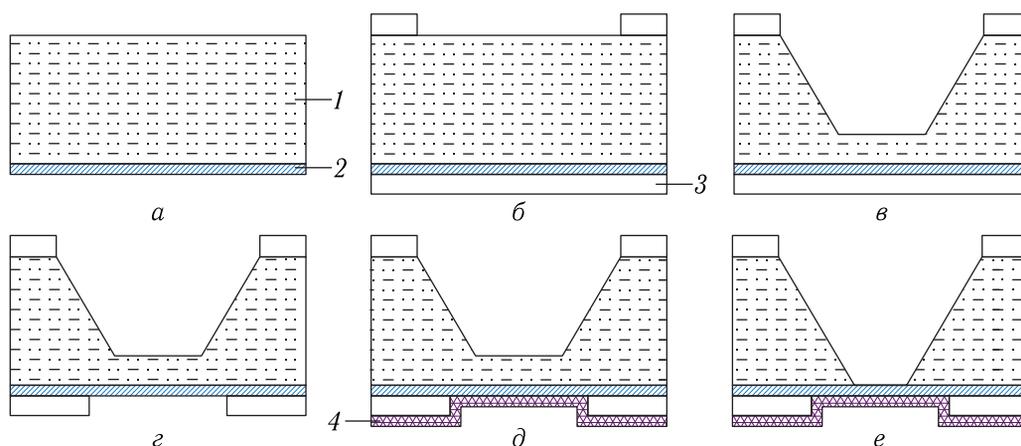


Рис. 4. Схема маршрута технологического процесса изготовления кремниевого МУ: а, б, в — предварительное формирование мембраны; г, д, е — окончательное формирование мембраны; 1 — кремниевая пластина; 2 — легированная область; 3 — маскирующий слой; 4 — слой металла

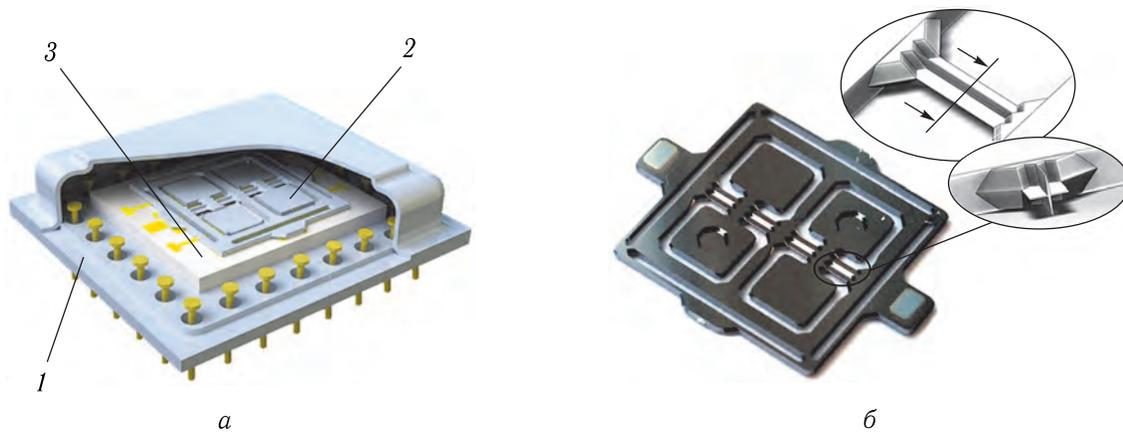


Рис. 5. Структурная схема ЧЭ кремниевого акселерометра с торсионным подвесом (а) и образец МУ (б): 1 — корпус; 2 — МУ; 3 — статорная пластина

осажденной маски для заключительного сквозного травления. Затем для подачи потенциала на $p-n$ переход на обратную сторону пластины напыляется слой металла (4). Формирование упругого подвеса балочного типа выполняется в результате процесса электрохимического стоп-травления с подачей потенциала на пластину в концентрированном растворе щелочи (КОН) при высокой температуре. В момент, когда травление доходит до легированной области, $p-n$ переход исчезает, что приводит к пассивации легированной области и остановке травления. Заключительное сквозное травление пластины проводится во фторсодержащей плазме через маскирующий рисунок на обратной стороне пластины. В данной технологии нет необходимости применять кремниевые пластины с высокими требованиями к TTV пластин, достаточно иметь равномерность по пластине ± 5 мкм, так как сам метод гарантирует равномерность толщины формируемой балки упругого подвеса по всей пластине при групповом электрохимическом травлении. Разработанная технология позволяет изготавливать ЧЭ с балочным упругим подвесом с точностью 1 мкм и выходом годных до 80% (по результатам измерения 200 пластин с 11 шт. ЧЭ на пластине).

Акселерометры с кремниевыми торсионными подвесами

С целью обеспечения механической стабильности ЧЭ по всем осям перемещения часто в МУ

инерциальных систем применяют торсионные подвесы. Один из вариантов конструкции ЧЭ акселерометра с кремниевым крестообразным подвесом представлен на рис. 5. МУ акселерометра состоит из двух параллельно расположенных балок, закрепленных по центральной оси с помощью крестообразных торсионов с рамкой, и термокомпенсационной внешней рамки с металлическими контактами, предназначенной для компенсации деформаций, возникающих при соединении материалов конструкции с разными температурными коэффициентами линейного расширения. МУ акселерометра методом анодного сращивания монтируется на стеклянную подложку (статорную пластину), на которой сформированы неподвижные металлизированные обкладки емкостных датчиков. Данная сборка монтируется в металлостеклянный корпус, герметично закрытый крышкой.

Основным требованием к торсионному крестообразному упругому подвесу является отклонение толщины его элементов не более ± 2 мкм. Торсионный упругий элемент изготавливается с помощью анизотропного жидкостного травления кремния в растворе щелочи под маской SiO_2 . Необходимый профиль объемной микроструктуры достигается за счет ориентирования топологического рисунка маски таким образом, что профиль травления в монокристаллическом кремнии образует ортогональные плоскости $\langle 100 \rangle$.

Последовательность технологических операций изготовления МУ представлена на рис. 6.

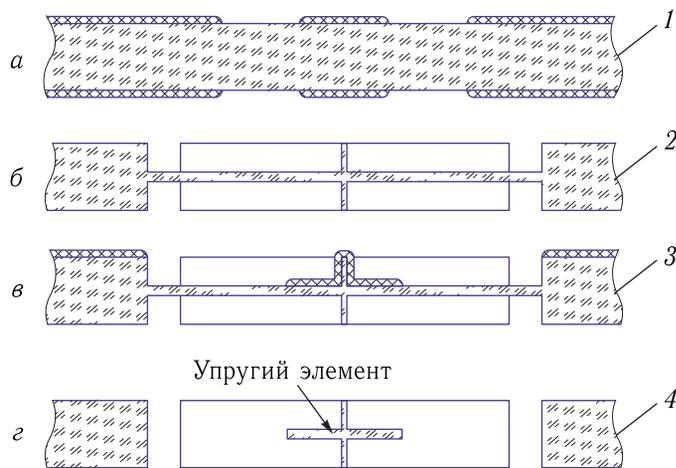


Рис. 6. Схема последовательности технологических операций изготовления МУ [7]

При групповом ЖХТ кремния из-за неравномерности пластины по толщине возникают значительные отклонения размеров по пластине, что вынуждает проводить индивидуальное завершающее травление МУ до необходимых размеров и ведет к значительному увеличению трудоемкости изделия. Для увеличения повторяемости геометрии торсионного крестообразного подвеса и для обеспечения соответствия размеров горизонтального и вертикального элемента креста был разработан набор фотошаблонов под различные диапазоны толщин кремниевых пластин, используемых для изготовления МУ. Кроме того, важным является применение кремневых пластин с $TTV < 1$ мкм для формирования всех маятниковых торсионов на пластине одной толщины в требуемом допуске и высокими требованиями по шероховатости ($Ra < 1$ нм) для получения ровных, а не волнистых линий в маске и последующего ровного краевого профиля травления в кремнии.

Разработанная технология позволила реализовать групповое изготовление МУ акселерометров, повысив выход годных приблизительно до 75% (по результатам измерения 70 пластин диаметром 100 мм с количеством ЧЭ на пластине 20 шт.) при сохранении требуемой точности к торсионным упругим элементам.

Аналогичный крестообразный упругий подвес применяется в компенсационном акселерометре с кремниевым МУ, показанном на рис. 7 [10].

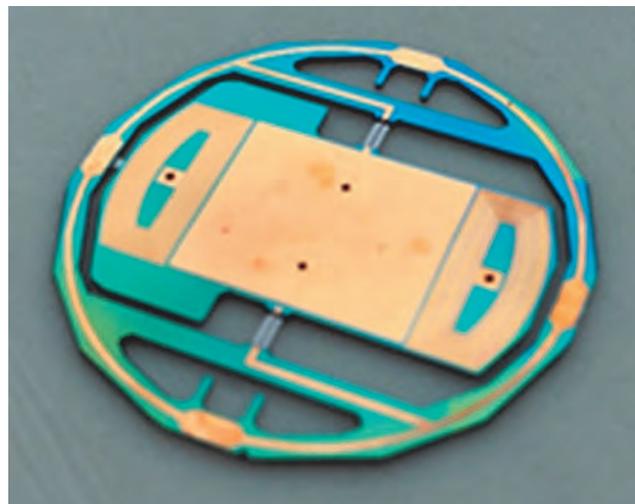


Рис. 7. Образец кремниевого МУ с торсионным подвесом, входящего в состав ЧЭ компенсационного акселерометра

Отличительной особенностью такого датчика является расположение тонкопленочных катушек индуктивности непосредственно на поверхности ЧЭ (инерциальной массе), что упрощает конструкцию и повышает ее надежность и повторяемость.

Формирование объемной структуры МУ, включая крестообразный торсион, выполнялось аналогично предыдущей описанной технологии. Ключевой задачей разработки данной технологии было формирование катушек индуктивности системы обратной связи на поверхности пластины при отсутствии разрывов и замыканий проводников.

Изоляция между металлом и кремнием выполнена двуслойной пленкой диэлектриков, благодаря чему удалось решить ряд технологических трудностей, среди которых увеличение адгезии металлического слоя к подложке и достижение требуемого сопротивления изоляции на пробой и формирование маски для травления с минимальным подтравом. Для реализации последовательного электрического подключения катушек индуктивности на противоположных сторонах МУ были предусмотрены переходные металлизированные отверстия и токоподводы на упругих крестообразных торсионах. Формирование этих отверстий проводилось методом ЖХТ с профилем стенки вдоль кристаллографической плоскости кремния 111). Вся металлизация выполнялась единым циклом напыления и травлением

через фоторезистивную маску. Таким образом, разработанная технология позволила изготовить МУ акселерометров с торсионными крестообразными подвесами и тонкопленочными двусторонними индуктивными катушками системы обратной связи. Важным является так же, как и в предыдущей конструкции, применение кремниевых пластин с $TTV < 1$ мкм и $Ra < 1$ нм. Из-за сложности технологического процесса и большого количества операций выход годных при изготовлении вышеуказанного конструктивного варианта составил приблизительно 20% (по результатам измерения 30 пластин диаметром 100 мм с количеством ЧЭ на пластине 7 шт.)

Гироскопы с кремниевым кольцевым резонатором

Одним из наиболее перспективных МЭМС датчиков угловой скорости является гироскоп с кремниевым кольцевым резонатором, представленный на рис. 8.

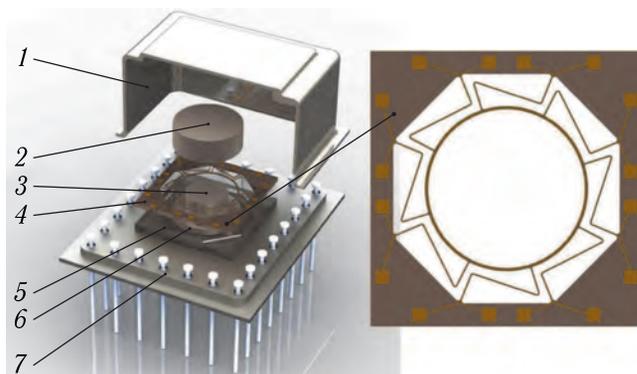


Рис. 8. Структурная схема ЧЭ МЭМС гироскопа с кремниевым резонатором [11]. 1 — крышка; 2, 6 — магнитопроводы; 3 — постоянный магнит; 4 — кристалл резонатора (ЧЭ); 5 — стеклянное основание; 7 — основание корпуса

ЧЭ гироскопа представляет собой кристалл, выполненный из монокристаллического кремния с ориентацией (111), в котором упругое кольцо, находящееся в магнитном поле, подвешено на тонких упругих перемычках-ламелях.

По каждой ламели проходит пара металлических тонкопленочных проводников, изолированных

от кремния оксидом кремния. В технологии изготовления кольцевого резонатора особые требования предъявляются к микрообработке ЧЭ при формировании геометрии упругого кольца и ламелей. Вся подвижная часть резонатора имеет толщину 100 мкм и прямоугольный профиль с разной шириной, отклонение этих размеров от номинальных не должно превышать 2 мкм.

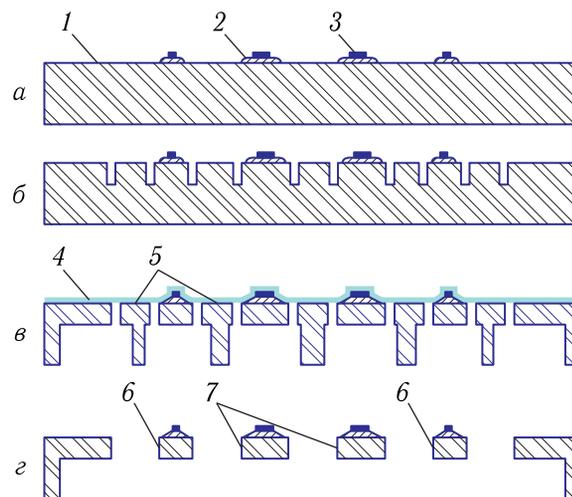


Рис. 9. Схема технологического маршрута изготовления кремниевых кольцевых резонаторов для ЧЭ гироскопа: а — формирование изоляции и проводников; б — формирование структуры ЧЭ; в — формирование сквозных отверстий; г — высвобождение балластных элементов; 1 — кремниевая пластина; 2 — оксид кремния; 3 — металл; 4 — полимерная пленка-носитель; 5 — балластные элементы; 6 — сечения ламелей; 7 — сечение кольца

Общая схема разработанного технологического маршрута для изготовления ЧЭ (рис. 9) включает этап формирования изоляционного слоя и тонкопленочных проводников, этап формирования на лицевой стороне подложки структуры ЧЭ Bosch-травлением на глубину 100 мкм по рисунку, представляющему собой замкнутые контуры вокруг удаляемых зон внутри кольца и ламелей, внутри которых остаются балластные элементы.

На следующем этапе на лицевой стороне пластины со сформированной структурой создается полимерная пленка, а по обратной стороне проводится сквозное Bosch-травление на глубину порядка 300 мкм. Пленка, помимо удержания кристаллов и балластных элементов в составе пластины после сквозного травления, также препятствует

проникновению охлаждающего гелия в процессе травления из подложкодержателя установки в рабочую зону. Удаление полимерной пленки, разделение пластины на кристаллы и высвобождение балластных элементов происходит на заключительном этапе травления в кислородной плазме [12].

В результате оптимизации процесса Bosch-травления удалось добиться вертикального профиля стенок подвижной части ЧЭ с отклонением менее 1 мкм на 100 мкм глубины. Также использование полимерной пленки значительно сократило трудоемкость изготовления благодаря отсутствию необходимости формирования и удаления технологических перемычек для удержания кристаллов и балластных элементов в составе пластины. Важным является, как и в предыдущей конструкции, применение кремневых пластин с $TTV < 1$ мкм для изготовления всех модулей на пластине, имеющих одну толщину, т.е. чтобы исключить операцию индивидуального дотравливания и увеличения трудоемкости изделий. Разработанная технология позволяет изготавливать ЧЭ с выходом годных приблизительно 80% (по результатам измерения 10 пластин диаметром 100 мм с количеством ЧЭ на пластине 30 шт.).

Акселерометр с металлическим подвесом

С целью замещения акселерометров Honeywell QAT-160, применяемых во внутрискважинной системе ориентации при бурении нефтяных и газовых скважин, была разработана технология изготовления составных частей ЧЭ, выполненного по конструкции, описанной в [13]. Данный акселерометр (рис. 10) является компенсационным и по принципу работы схож с вышеописанными вариантами, однако ключевой особенностью являются жесткие условия его эксплуатации, предусматривающие сильные ударные, вибрационные и температурные воздействия. Для достижений требуемых характеристик ЧЭ выполняется из двух полумаятников (рис. 10, а), выполненных из объемно-обработанного монокристаллического кремния, упругих перемычек (рис. 10, б), выполненных из бериллие-

вой бронзы и двух статорных ситалловых с металлическим рисунком пластин (рис. 10, в).

Соединение составных частей осуществляется методом прецизионной склейки и сборки. Неподвижные элементы для фиксирования МУ в корпусе выполнены из ситалловых статорных пластин с металлизацией, выполняющей роль обкладок дифференциальной емкости.

Ключевыми результатами при разработке технологии и отработке операций изготовления составных частей МУ стали реализация возможности совмещения топологии на этапах микрообработки на кристалльном производстве и этапе лазерной обработки при формировании линий реза, а также улучшение механических параметров (повышение предела текучести) бронзовой упругой перемычки за счет упрочняющего отжига.

На основании существующих на предприятии и вновь разработанных технологических процессов были созданы сквозные технологические процессы изготовления кремниевых полумаятников с тонкопленочными медными контактными площадками; бронзовых упругих перемычек и ситалловых статорных пластин с тонкопленочными медными обкладками. Высоких требований к кремниевым пластинам по толщине и шероховатости конструкция данного МУ не предусматривает. Достаточно иметь пластины с $TTV < 5$ мкм и $Ra < 3$ нм. Разработанная технология позволяет изготавливать маятниковый подвижный узел с точностью 10 мкм и выходом годных приблизительно 80% (по результатам измерения 10 пластин диаметром 100 мм с количеством ЧЭ на пластине 12 шт.).

Заключение

В работе рассмотрены различные конструктивно-технологические варианты ЧЭ МЭМС инерциальных датчиков и приведены результаты разработки технологии их изготовления. Ключевой особенностью разработанных методов групповой микрообработки является акцент на повышении повторяемости формируемых размеров микроструктур, увеличение выхода годных и снижение трудоемкости производства. Причем на эти параметры при изготовлении ЧЭ из кремния в наибольшей степени

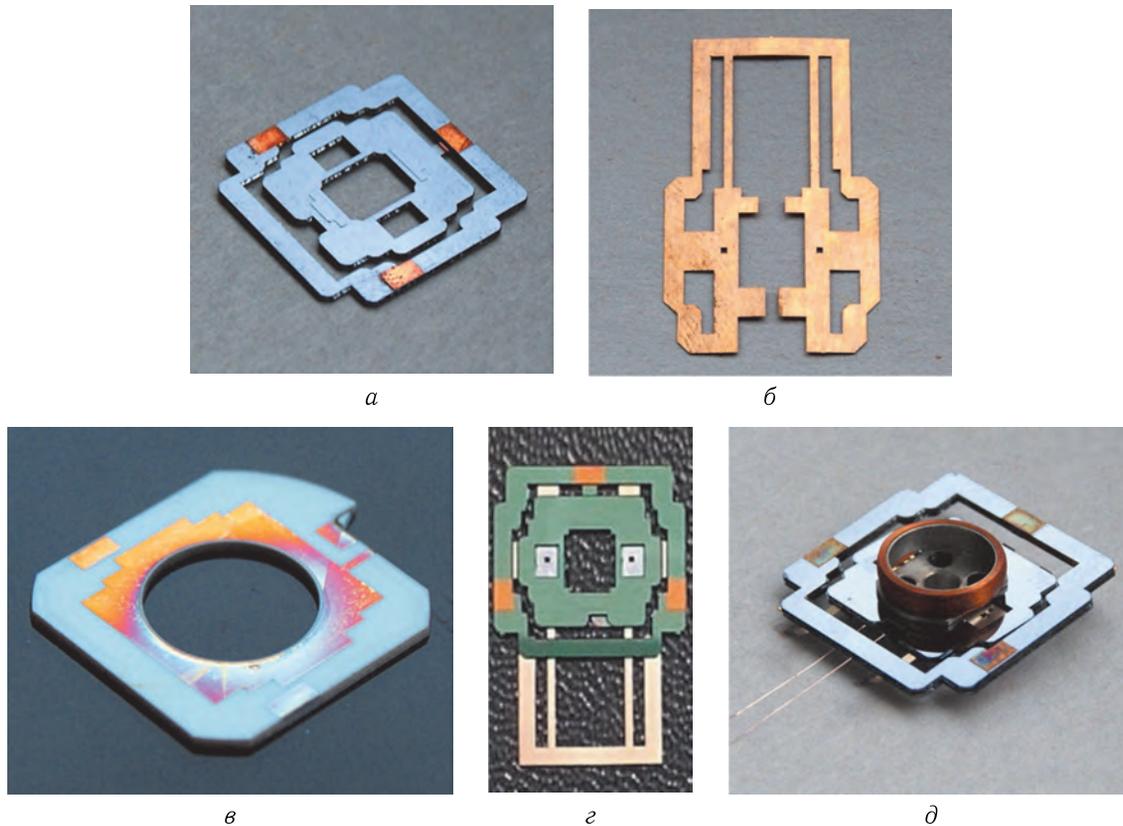


Рис. 10. Фотографии изготовленных образцов ЧЭ акселерометра: *а* — полумаятник; *б* — упругая перемычка; *в* — ситалловая статорная пластина; *г* — маятниковый подвижный узел (заготовка); *д* — маятниковый подвижный узел (сборка)

оказывают влияние более высокие технические требования к кремниевым пластинам: равномерность пластин по толщине ($TTV < 1$ мкм), крайне необходимая при групповом глубинном жидкостном травлении, и качество полировки их поверхности ($Ra < 1$ нм), а также отсутствие внутренних напряжений и дефектов, вскрывающихся при глубинном травлении. На выход годных при изготовлении ЧЭ из кварца в наибольшей степени оказывает влияние также равномерность пластин по толщине ($TTV < 1$ мкм) и качество материала пластин, то есть наличие в их теле и на поверхности скрытых заполированных царапин и пузырей, не видимых при визуальном осмотре. Кроме того, важным является точность совмещения двустороннего топологического рисунка на пластинах при выполнении двусторонней фотолитографии приблизительно $\pm 0,5$ мкм.

Таким образом, помимо изготовления экспериментальных образцов, представленные техноло-

гии позволяют реализовать мелкосерийное производство различных конструктивно-технологических вариантов ЧЭ МЭМС инерциальных датчиков с отклонениями размеров ключевых элементов до 1 мкм.

Список литературы

1. *Hathi B. et al.* Huygens HASI servo accelerometer: A review and lessons learned // *Planetary and Space Science*. 2009. № 57. P. 1321–1333.
2. *Савенко Н.* Акселерометры и гироскопы для портативных устройств // *Современная электроника*. 2006. № 6. С. 18–21.
3. *Choundhary V., Iniewski K.* MEMS. Fundamental technology and applications. // *CRC Press*. 2013. 478 p.
4. *Минкин А.М.* Технологические основы формообразования чувствительного элемента из кварцевого стекла методом химического травления через

- текстурированное молибденовое покрытие. Дисс. ... канд. техн. наук. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Пермь, 2020. 116 с.
5. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Под общ. ред. д. т. н. В. Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»», 2009. 280 с.
 6. *Бом С.Дж.* Оптимизация параметров и моделирование рабочих режимов в компенсационных акселерометрах типа Q-flex и Si-flex. Дисс. ... канд. техн. наук. 05.11.03. Москва, 2012. 239 с.
 7. Патент № 2656109 С1 Российской Федерации. Способ изготовления чувствительного элемента акселерометра: № 2017109870; заявл. 24.03.2017; опубл. 31.05.2018 / Д. В. Козлов, И. П. Смирнов, А. С. Корпухин, В. М. Запетляев, Г. А. Исакова. Бюлл. № 16. 12 с.
 8. *Харламов М. С., Гусева О. С., Коновалов С. Ф.* Особенности применения реактивного ионного травления кварца при изготовлении маятниковых узлов Q-flex акселерометров // Микроэлектроника. 2020. Т. 49, № 2. С. 1–12.
 9. Патент № 2514150 Российской Федерации. Акселерометр: № 2012150511/28; заявл. 26.11.12; опубл. 27.04.14 / Л. И. Августов, А. Е. Рудов, В. И. Баженов, Н. А. Горбачев, Ю. В. Соловьев. Бюлл. № 12. 11 с.
 10. Патент № 2543708 Российской Федерации. Компенсационный маятниковый акселерометр: № 2013136104/28; заявл. 31.07.13; опубл. 10.03.15 / С. Ю. Юрманов, Р. А. Денисов, Н. Ю. Макарова, В. Ю. Мальков, М. В. Шимин, С. Ф. Коновалов, Д. В. Майоров, Ю. А. Пономарев, В. И. Шабаев, В. П. Подчезерцев. Бюлл. № 7. 10 с.
 11. *Иванов С. Ю.* Разработка цифровой электронной подсистемы микромеханического гироскопа с кольцевым резонатором // Труды МФТИ. 2016. Т. 8, № 2.
 12. Патент 2686119 С1 Российской Федерации. Способ разделения пластин на чипы и получения сквозных отверстий большой площади для изделий микроэлектроники: № 2018125704; заявл. 12.07.2018; опубл. 24.04.2019 / М. С. Харламов. Бюлл. № 12. 8 С. 142–152.
 13. Патент 2731652 С1 Российской Федерации. Маятниковый компенсационный акселерометр: № 20190107343; заявл. 15.03.2019; опубл. 07.09.2020 / С. Ф. Коновалов, Д. В. Майоров, Ю. А. Пономарев, В. Е. Чулков, А. Е. Семенов, М. С. Харламов. Бюлл. № 25. 27 с.