УДК 621.382.2/.3

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. АКСЕЛЕРОМЕТРЫ И ГИРОСКОПЫ

Михаил Михайлович Андроник, Сергей Дмитриевич Бочков, Айдар Радикович Габидуллин, Алина Александровна Доброносова, Татьяна Сергеевна Жулева, Юлия Сергеевна Макарова, Александр Сергеевич Метелев, Бахруллохуджа Бахадурович Самадов, Алексей Станиславович Самарцев, Анастасия Александровна Тюлькова, Роман Харисович Шамшединов, Анна Эрнестовна Янчелик

Студенты 1 курса магистратуры
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.Б. Цветков,
Доктор наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра "Электронные технологии в машиностроении"

Ключевые слова: МЭМС (MEMS), акселерометр (accelerometer), гироскоп (gyroscope).

Аннотация: В работе проанализирован рынок производства микроэлектромеханических (МЭМС) систем, рассмотрены устройства, включающие в себя МЭМС и разобран физический принцип действия. Проведена классификация наиболее часто встречающихся устройств (акселерометров и гироскопов) и кратко описан принцип действия каждого. Проведен патентный поиск, на основе которого предложены технологии изготовления функциональных элементов рассматриваемых устройств. Для разработанных технологий было подобрано оборудование, позволяющее осуществить их реализацию и спроектирован участок чистого производственного помещения.

Введение

На сегодняшний день различные устройства и объекты нашего мира все более плотно контактируют с цифровыми информационными сетями. Можно сказать, что цифровой и физический мир сливаются в один. В частности, использование электронных устройств помогают сформировать взаимопонимание между людьми и окружающим миром.

Микроэлектроника присутствует во многих бытовых и промышленных изделиях, от детских игрушек до современного вооружения. Пожалуй, самым впечатляющим типом микроструктур, которые создаются людьми, являются МЭМС – микроэлектромеханические системы. Под этой аббревиатурой ученые и специалисты понимают миниатюрные системы, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты, созданные по технологии от 1 до 100 микрометров. Другими словами, МЭМС – это множество микроустройств самой разнообразной конструкции и назначения, которые производятся с использованием современных технологических приемов микроэлектроники. За последние 30 лет была сформирована прочная технологическая база, которая позволяет ощущать и даже приводить в движение элементы внутри устройства.

За понятием МЭМС скрывается огромное многообразие устройств, чувствительных к механическому, электромагнитному, химическому, биологическому или иному интерфейсу, понятие которого интенсивно расширяется. Входными параметрами для МЭМС являются, например, давление, ускорение, температура, акустика, свет, магнитные поля, электрические поля, гравитационное поле, газ, ДНК и др.

Таким образом, целью данной работы является ознакомление с понятием МЭМС устройства. Для этого требуется разобрать базовые конструкции и описать их типовые технологические процессы изготовления.

Модель МЭМС

Для формирования представления о поведении микромеханической подвижной системы необходимо выбрать расчетную схему, содержащую основные функциональные компоненты и лимитирующие физические параметры (рис.1).

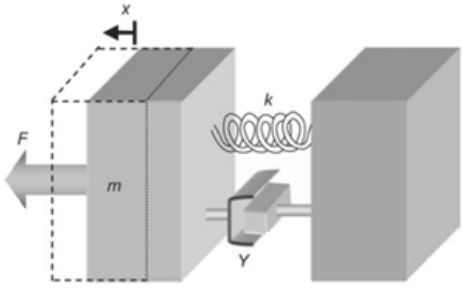


Рис. 1. Модель динамической колебательной системы

Резонаторы, перемещающиеся посредством приложения внешней силы, можно описать, по меньшей мере, тремя различными параметрами: коэффициентом жесткости упругого элемента *k*, эффективной массой *m* и коэффициентом сопротивления колебаниям *c*. Жесткость упругого элемента зависит от выбранного материала и конструкции резонатора, а в резонансных случаях от конкретной моды колебаний. Эффективная масса является мерой размера подвижной части, но она также зависит от крепления на кристалле, а коэффициент сопротивления учитывает, как внутренние, так и внешние утечки энергии из системы.

Такого рода резонаторы, как правило, колеблются посредством гармонических возмущений. В таких случаях динамическое движение механического резонатора можно описать дифференциальным уравнением:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \tilde{F}\cos(\omega t)$$

Акселерометры

Чрезвычайно малый размер позволяет использовать MEMS в различных миниатюрных устройствах, начиная от механических часов и заканчивая имплантатами для человека. Самым распространенным МЭМС-устройством является акселерометр. Акселерометр – это прибор для измерения ускорения в одном или нескольких направлениях. Микроакселерометры можно определить, как акселерометры, созданные при помощи технологий микроэлектроники и являющихся МЭМС. Его характерной особенностью является малый размеры – не более нескольких десятков миллиметров.

Наиболее распространенными применениями акселерометров являются: мобильные телефоны, автомобильное производство, элементы компьютерной техники, игровые консоли и т.д.

Принцип работы акселерометров основан на измерении смещения инерционной массы относительно корпуса и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Емкостной метод преобразования измеренного перемещения является наиболее точным и надежным, поэтому емкостные акселерометры получили широкое распространение.

Структура емкостного акселерометра состоит из различных пластин, одни из которых являются стационарными, а другие свободно перемещаются внутри корпуса. Между пластинами образуется конденсатор, величина емкости которого зависит от расстояния между пластинами. Под влиянием силы ускорения емкость конденсатора меняется.

Современные интегральные датчики изготавливаются на кристалле кремния по технологии iMEMS (integrated Micro Electro Mechanical System). Структура датчика

представляет собой кремниевую подложку, на которой расположен чип датчики и схема усиления сигнала.

Рассмотрим подробнее конструкцию простейшего осевого микроакселерометра. Его принципиальная схема приведена на рисунке 4. Чувствительный элемент (ЧЭ) включает в себя инерционную массу (ИМ) 1, упругие элементы подвеса 2, опорную рамку 3.

ЧЭ имеет две пары упругих элементов, крестообразно расположенных вдоль осей x, z. Начало осей x, z находится в геометрическом центре пластин ИМ. Ось чувствительности – ось y.

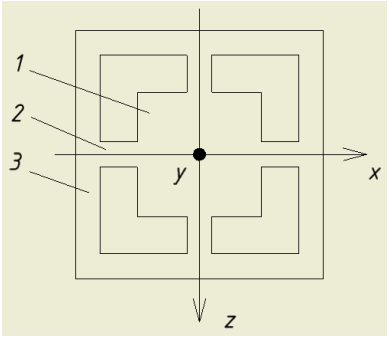


Рис. 2. Принципиальная схема ЧЭ осевого микроакселерометра

По виду движений ИМ акселерометры делятся на осевые и маятниковые. В осевых акселерометрах конструкция упругого подвеса обеспечивает прямолинейное движение ИМ, а в маятниковых – угловое. Маятниковые акселерометры называют также угловыми или балочными. По виду преобразования энергии акселерометры подразделяются на: емкостные, пьезорезистивные, пьезоэлектрические и тепловые.

По принципу измерения акселерометры делятся на приборы прямого и компенсационного измерения (преобразования).

Основными характеристиками акселерометров является чувствительность, диапазон измерений, полоса пропускания частот, масштабный коэффициент, точность, быстродействие.

Было рассмотрено около 37 патентов и было выбрано 9 наиболее интересных из них [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Также учитывалось наличие описания процесса изготовления акселерометра. Из 9 патентов был выбран один [6], в котором наиболее подробно рассмотрен технологический процесс изготовления акселерометров. Также на данный момент он является одним из распространенных видов акселерометров, к тому же годом заявки является 2013 год. Это означает, что конструкция новая и вполне возможно уже используется в реальных объектах. Это акселерометр емкостного осевого типа.

На рисунке 3 и в таблице 1 представлен трёхкомпонентный (трёхосевой) акселерометр и этапы технологического процесса его изготовления. Чувствительность осей x и y, расположенных в латеральном плане, обеспечивается формированием ёмкости между инерционной массой, присоединенной на упругих подвесах к раме, и участками под контактные площадки. Чувствительность же оси z не может быть обеспеченна этими средствами, т.к. жесткость упругих подвесов оказывается слишком велика. Для решения этой проблемы вводиться единый конструктивный элемент в виде металлической пластины, выполняющий функции ёмкостной пластины, упругого металлического подвеса и анкера. При изменении ускорения в нормальном направлении ёмкостная пластина отклоняется, в то время как инерционная масса откланяется весьма мало. Таким образом, в роли инерционной массы в этом случае выступает ёмкостная пластина, а инерционная масса выступает в роли ёмкостной пластины. Вся конструкция закрывается защитной пластиной.

Чувствительность данного акселерометра по трём осям достигается путём введения всего лишь незначительного дополнения в конструкцию, что выгодно отличает его от аналогичных акселерометров, представляющих собой набор отдельных однокомпонентных акселерометров, заключённых в единый корпус.

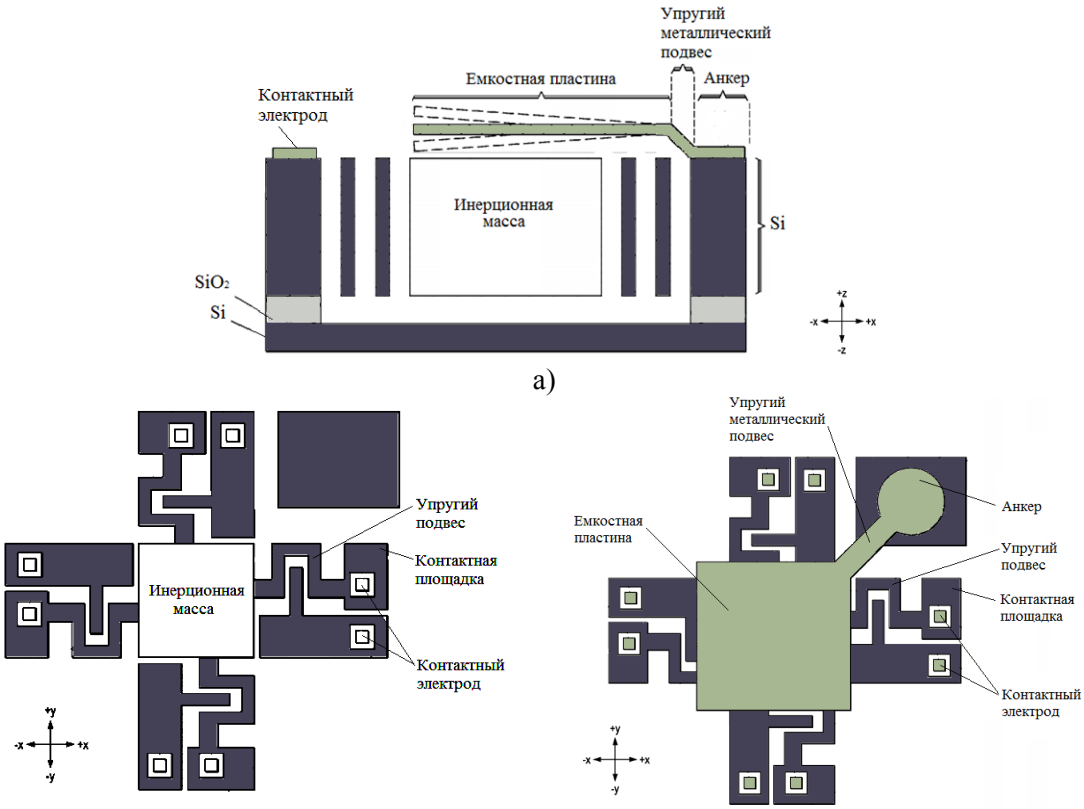
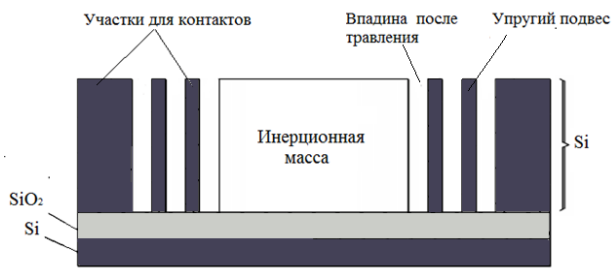
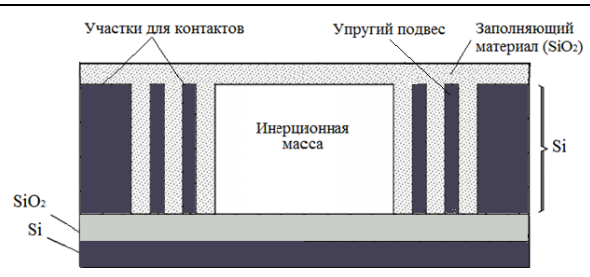
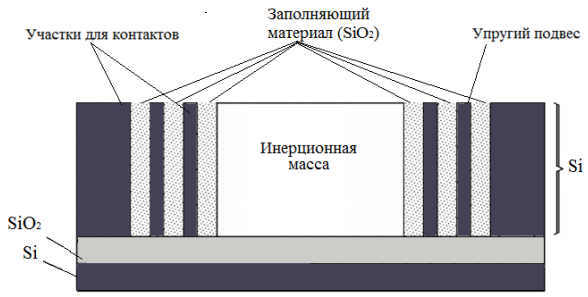


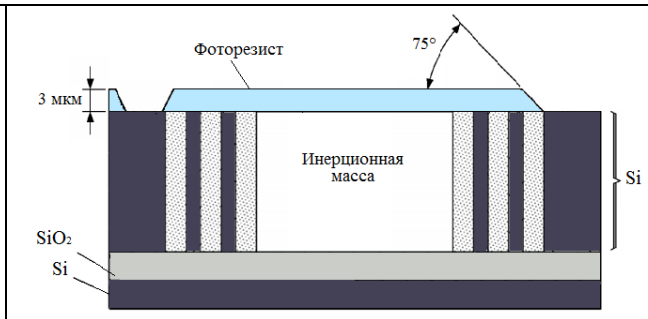
Рис. 3. Конструкция осевого акселерометра: а – схема прибора в разрезе; б – вид сверху без металлической пластины; в – вид сверху

Таблица 1. Технология изготовления осевого акселерометра

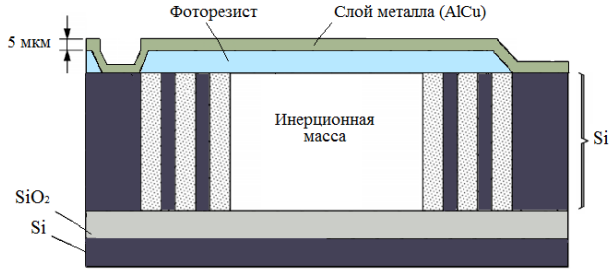
1) Исходная подложка SOI	2) Глубокое реактивное ионное травление (DRIE)
	
3) Плазмо-химическое осаждение из газовой фазы (PECVD) заполняющего материала (SiO_2)	4) Химико-механическое полирование (CMP)
	
5) Травление и выравнивание поверхности	6) Нанесение фоторезиста



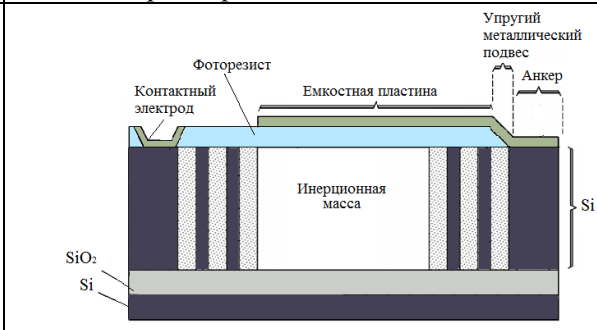
7) Осаждение металла



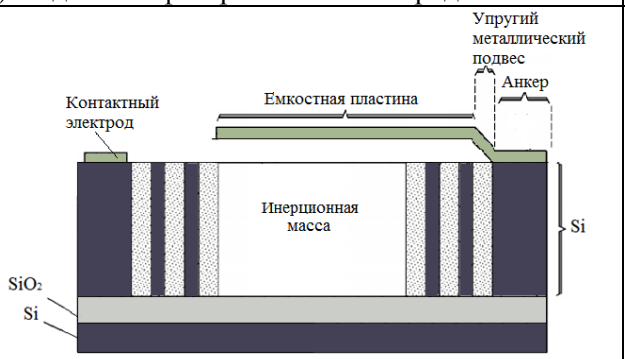
8) Формирование металлических элементов акселерометра

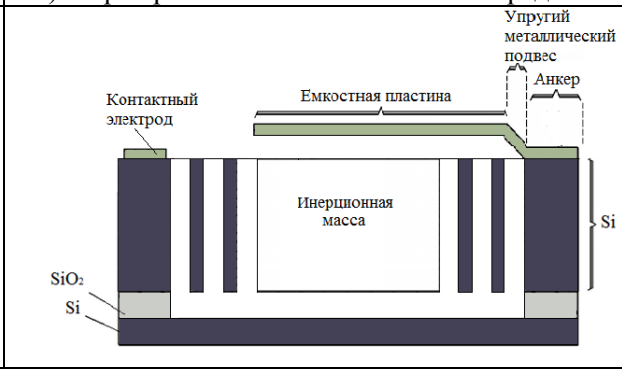


9) Удаление фоторезиста в кислородной плазме

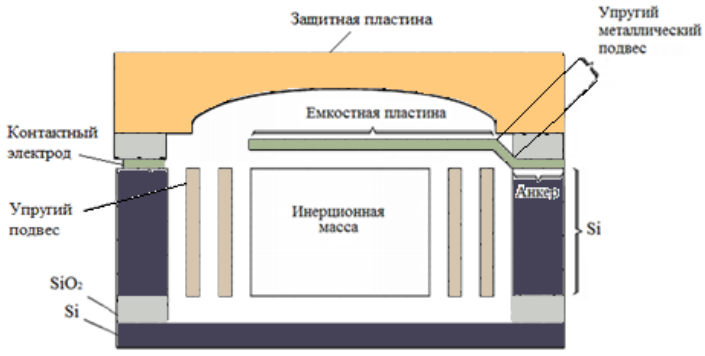


10) Формирование полости в газовой среде HF





11) Установка защитной пластины



Гироскопы

Гироскоп – устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета. Его основное предназначение заключается в измерении угловых скоростей относительно одной или нескольких осей.

Известно большое количество разнообразных схем ММГ (микромеханических гироскопов). Общим конструктивным признаком ММГ – вибрационных датчиков угловой скорости, является использование в них различных по конфигурации двухстепенных упругих

подвесов чувствительного элемента (ЧЭ). Принцип работы ММГ заключается в создании относительно корпуса знакопеременного поступательного либо вращательного движения ЧЭ по одной из степеней свободы и измерении перемещений по другой степени свободы, возникающих под действием кориолисовых сил или гироскопических моментов при наличии переносной угловой скорости корпуса. На рисунке 4 этот принцип поясняется на примере ММГ с двухстепенным упругим подвесом и поступательными перемещениями ЧЭ. При наличии знакопеременной относительной линейной скорости V вдоль оси OX и переносной измеряемой угловой скорости Ω вокруг оси OZ появляются знакопеременное ускорение Кориолиса $W_К$ и соответствующая ему сила $F_К$ вдоль оси OY.

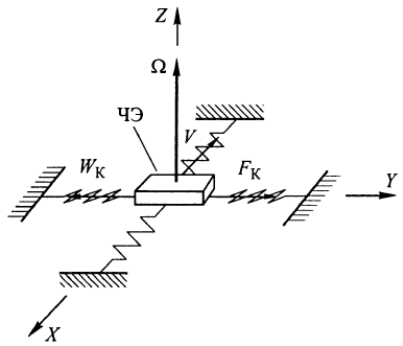


Рис. 4. Принцип работы микромеханического гироскопа

По виду движения инерционной массы в режиме движения и режиме чувствительности различают гироскопы LL-типа (linear-linear) или LL-гироскопы; гироскопы RR-типа (rotare-rotare), или RR-гироскопы, и LR-типа или LR-гироскопы. В LL-гироскопах инерционные массы в режиме движения и режиме чувствительности совершают поступательные перемещения, в RR-гироскопах – вращательные пермещения, в LR (RL) – гироскопах – различные комбинации поступательных и вращательных перемещений инерционных масс.

Каждый вид микрогироскопа характеризуется набором классификационных признаков, важнейшими из которых являются следующие.

1. Число измерительных осей
2. Число инерционных масс
3. Тип подвеса
4. Наличие кинематических связей
5. Вид перемещения инерционной массы
6. Тип привода (обратные преобразователи)
7. Тип датчика съема сигнала (обратные преобратные преобразователи)

МГ могут работать в режимах прямого и компенсационного преобразования (измерений).

Наряду с рассмотренными видами разрабатываются МГ, которые можно определять как камертонные и волновые. Отличительным признаком камертонных МГ (КМГ) является наличие стержневых структур («ножек»). Существенно и то, что инерционная масса ножек, как правило, распределена вдоль их длины и имееется свободный, незакрепленный конец. При появлении перекрестной угловой скорости, вектор которой перпендикулярен к векторам количества движения элементарных масс, распределенных вдоль ножек, возникают силы инерции Кориолиса, генерирующие вторичные колебания ножек КМГ.

Отличительным признаком волновых МГ является наличие резонаторов, имеющих форму кольца, которое с помощью упругих элементов подвеса скреплено с корпусом, либо форму стержня, закрепление которого в корпусе не препятствует его продольным и поперечным колебаниям.

Типовыми характристиками МГ являются: диапазон измерений, чувствительность, полоса пропускания частот, масштабный коэффициент и его стабильность, перекрестная чувствительность, шум, температурная стабильность характеристик.
В результате патентного поиска было проанализировано множество патентов [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Для более детальной проработки были выбраны 2 патента [11, 12], т.к. в них гироскопы имеют конструкцию, которая имеет очень компактное расположение элементов. Также по отдельности данные патенты дают не только подробное изложение технологии изготовления устройства, но и качественные иллюстрации.

В совокупности информация из выбранных патентов дает представление о конструкции и технологии изготовления трехосевого гироскопа (рис. 5, табл. 2). Технологию изготовления гироскопа будем рассматривать, взяв за основу уже имеющуюся подложку монокристаллического кремния p – типа, содержащую карманы n – типа, на которой уже сформированы все компоненты. Например, в данном случае подложка содержит n-p-n транзистор, имеющий коллекторную зону n^+ - типа, зону базы p – типа и эмиттер n^+ – типа. На поверхности подложки также сформированы зона чувствительного элемента и зона соединения n^+ – типа.

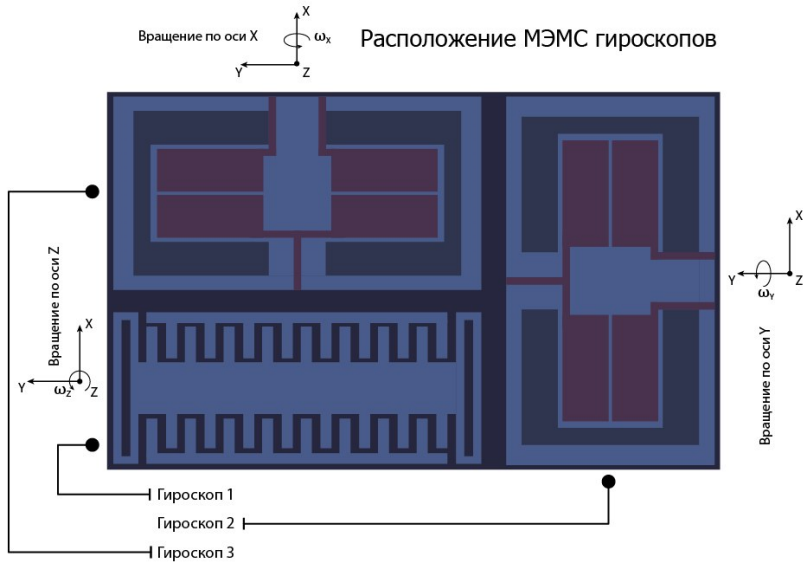
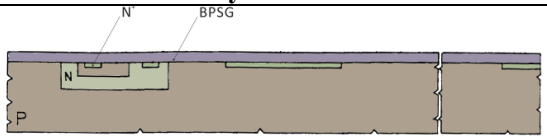
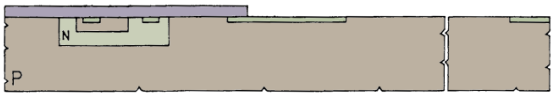
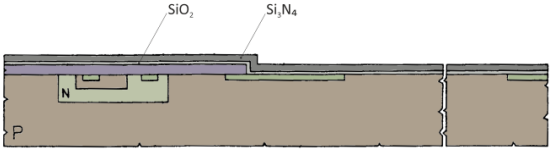
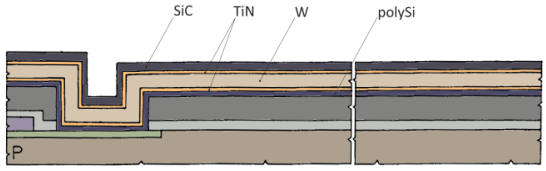
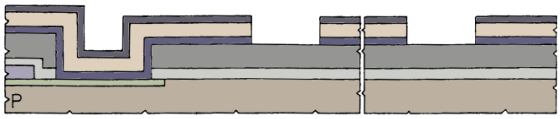
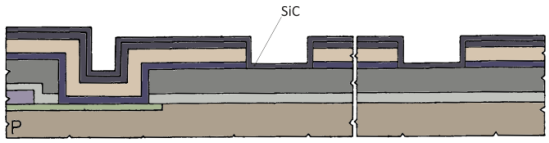
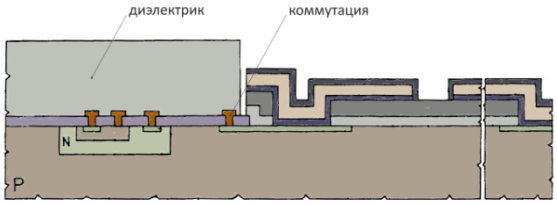
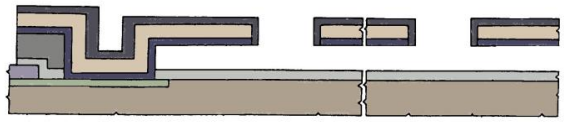


Рис. 5. Трехосевой гироскоп

Таблица 2.Технологический процесс изготовления трехосевого гироскопа

Схема полученных топологий	Описание
	Нанесение на поверхность пластины диэлектрического слоя BPSG (борофосфосиликатное стекло).
	Стравливание диэлектрического слоя BPSG над зоной чувствительного элемента
	Формирование слоя оксида кремния (SiO2) при низкой температуре. Затем, нанесение слоя нитрида кремния (Si3N4) с помощью CVD (метода химического осаждения).
	Наносится жертвенный слой SiO2, толщиной около 2 мкм, который впоследствии стравливается вместе с двойным слоем из Si3N4 и SiO2 в зоне соединения n+ – типа, где будет сформирована подвижная масса.

Продолжение табл. 2

	Формирование тонкого слоя поликристаллического кремния (около 0,35 мкм); первого адгезионного слоя (например, из нитрида титана) для обеспечения адгезии со следующим слоем; слоя вольфрама (около 1 мкм толщиной); второго адгезионного слоя и затем первого слоя карбида кремния (около 0,2 мкм толщиной). В зоне стравленного в предыдущем этапе слоя образуется крепление для сейсмической массы.
	Анизотропное травление зоны будущей подвесной микроструктуры через маску слоев SiC, TiN и W до жертвенного слоя SiO2. (на данном и следующих этапах адгезивные слои не показаны с целью упрощения).
	Формирование второго слоя SiC, толщиной примерно 0,2 мкм (стравленную в предыдущем этапе зону данный слой покрывает, а с оставшимся слоем SiC образует единый слой).
	Анизотропное травление второго слоя SiC в зоне будущей подвесной микроструктуры. Удаление жертвенного слоя и слоя Si3N4 с зоны для формирования контактов чувствительного элемента. Диэлектрический пассивный слой наносится и затем удаляется для обеспечения электрического контакта устройства.
	Удаление жертвенного слоя с помощью маски (например, в плавиковой кислоте), впоследствии чего формируется сейсмическая масса.

Участок изготовления функциональных элементов МЭМС

Для планировки участка изготовления МЭМС необходимо было для начала определиться с оборудованием. В то же время выбор оборудования зависит от режимов изготовления элемента. Поэтому первым этапом выполнения данной работы стал анализ технологических требований к МЭМС и задание необходимых режимов для удовлетворения требований.

Каждая операция была подробно рассмотрена и прописаны все режимы. В соответствии с ними было выбрано удовлетворяющее процессам оборудование. При выборе оборудования также учитывался фактор импортозамещения, в связи с чем набор требуемого для участка оборудования принял вид, представленный в таблице 3.

Таблица 3. Требуемое для участка оборудование

№	Процесс	Оборудование
1	PECVD нанесение	Установка PECVD SI 500 PPD
2	LTCVD нанесение	Установка LPCVD LC100 / LC102, ANNEALSYS
3	Магнетронное нанесение	Установка МВУ ТМ МАГНА Т
4	Нанесение, проявление и сушка фоторезистов	Установка проявление EVG®100
5	Экспонирование	Установка экспонирования и совмещения ЭМ-5096
6	Травление	Установка МВУ ТМ ПЛАЗМА РИТ-Т
7	Глубокое травление	Установка PlasmaPro Estrelas 100
8	CMP – Химико-механическое полирование	Высокоскоростная установка шлифовки и полировки Logitech

Чистое производственное помещение (согласно ГОСТ ИСО 14644-1—2002) – помещение, в котором контролируется концентрация взвешенных в воздухе частиц, построенное и используемое так, чтобы свести к минимуму поступление, выделение и удержание частиц внутри помещения и позволяющее контролировать другие параметры (температуру, влажность и давление).

В результате анализа технологий формирования функциональных структур МЭМС было подобранно необходимое для их реализации оборудование, а также предложен вариант планировки участка в чистом производственном помещении (рис.6).

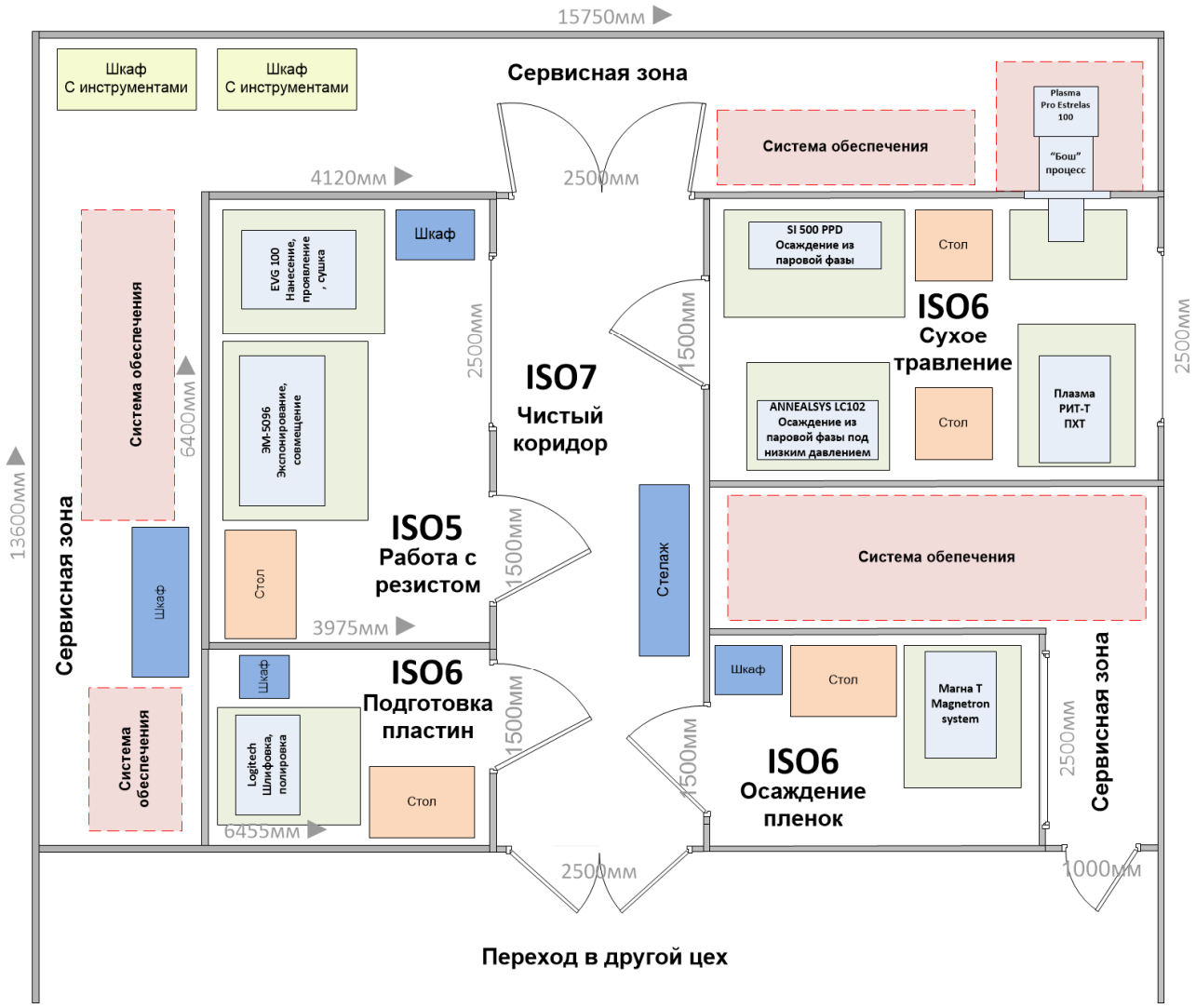


Рис. 6. Планировка чистого помещения для изготовления МЭМС

Выводы

Проведенный анализ существующих литературных данных позволил в подробной форме отразить все стороны сделанной работы. В данном отчете не только рассматриваются основные типы гироскопов и акселерометров, но также несколько слов посвящается и принципам работы, и основным производителям, и существующим по теме патентам и многое другое, что позволяет ознакомится с такими устройствами, как акселерометр и гироскоп, в наиболее полной степени.

Рассмотрение технологии производства того или иного устройства не просто было рассмотрено, но и подробно описано по каждой операции с рекомендациями по режимам и используемому оборудованию. Т.е. в итоге информация о технологии представляет собой некую маршрутную карту для получения гироскопов и акселерометров.

Немалой частью работы стали также выбор наиболее подходящего для лабораторных условий оборудования и формирования уже готовой чистой комнаты. В отчете это представлено даже в виде некоего бизнес-плана с готовым набором необходимого оборудования и с планировкой производственного помещения.

Получившийся обзор не только раскрывает рассматриваемую тему с физической стороны, но и отражает экономические аспекты формирования специализированного помещения, в условиях которого можно создать некое единичное производство акселерометров и гироскопов.

Заключение

Была выделена и обработана информация о принципах действия акселерометров и гироскопов, их основных видах и наиболее известных производителях.

Также был проведен патентный поиск, итогом которого стало предоставление списка основных патентов по рассматриваемой теме и выделение патентов на гироскоп и акселерометр, по представленным конструкциям которых был проведен дальнейший анализ технологии изготовления.

Следующим шагом формирования отчета было подробное описание последовательности действий по производству рассматриваемых устройств с указанием рекомендуемых режимов и требуемым для этого оборудованием.

Заключительным этапом стало формирование чистого производственного помещения для изготовления акселерометров и гироскопов с оборудованием, предварительно проанализированным и выбранным согласно выполняемым в технологии операциям.

Литература

1. Acar et al. United States Patent 9,062,972: Mems multi-axis accelerometer electrode structure (June 23, 2015) // United States patent and trademark office.
2. Nasiri et al. United States Patent 8,960,002: Vertically integrated 3-axis MEMS angular accelerometer with integrated electronics (February 24, 2015) // United States patent and trademark office.
3. Cui et al. United States Patent 7,094,622: Polymer based tunneling sensor (August 22, 2006) // United States patent and trademark office.
4. Langereis et al. United States Patent 8,686,519: MEMS accelerometer using capacitive sensing and production method thereof (April 1, 2014) // United States patent and trademark office.
5. Dwyer et al. United States Patent 8,365,596: Method for sensing acceleration using a translational mass in-plane MEMS accelerometer (February 5, 2013) // United States patent and trademark office.
6. Wu et al. United States Patent 8,362,578: Triple-axis MEMS accelerometer (January 29, 2013) // United States patent and trademark office.
7. Wu et al. United States Patent 8,106,470: Triple-axis MEMS accelerometer having a bottom capacitor (January 31, 2012) // United States patent and trademark office.
8. Guo United States Patent 7,736,931: Wafer process flow for a high performance MEMS accelerometer (June 15, 2010) // United States patent and trademark office.
9. Vaganov et al. United States Patent 7,367,232: System and method for a three-axis MEMS accelerometer (May 6, 2008) // United States patent and trademark office.
10. High-resolution in-plane tuning fork gyroscope and methods of fabrication, US 7043985 B2.
11. Microelectromechanical gyroscopes and related apparatus and methods, US 8661899 B2.
12. Process for manufacturing high-sensitivity capacitive and resonant integrated sensors, particularly accelerometers and gyroscopes, and sensors made therefrom, US 6090638 A.
13. Disc resonator gyroscopes, US 7581443 B2.
14. Vibratory gyroscopes and method for manufacturing the same, US 6389897 B1.
15. XY-axis shell-type gyroscopes with reduced cross-talk sensitivity and/or mode matching, US 9091544 B2.