

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 531.8; 681.518.3

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>

EDN KBLENU



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Микроэлектромеханические системы: путь к совершенствованию гироскопов

П.С. Кузнецов [@]

АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», Москва, 129226 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: ps_kuznetsov@mail.ru

• Поступила: 31.10.2024 • Доработана: 13.02.2025 • Принята к опубликованию: 21.03.2025

Резюме

Цели. Микросистемная техника является одним из наиболее популярных и перспективных направлений, которые активно развиваются в настоящее время. Область применения элементов микросистемной техники весьма широка. Настоящая работа направлена на всестороннее изучение процессов разработки и создания современных гироскопов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС-гироскопов). Целью исследования является анализ рисков, связанных с технологическими аспектами их производства, а также определение перспективных направлений для дальнейшего развития как самих МЭМС-гироскопов, так и технологий их изготовления.

Методы. В ходе работы осуществлен детализированный анализ существующих научных публикаций, аналитических обзоров и других доступных источников, посвященных МЭМС-гироскопам и актуальным трендам в области микрооптоэлектромеханических технологий и сегнетоэлектрических пленок.

Результаты. Представлено краткое описание конструктивных решений современных МЭМС-гироскопов, а также их интеграция в мехатронные системы. Рассматриваются технологии производства МЭМС-гироскопов и специфика используемого технологического оборудования. В отдельном разделе обсуждаются аспекты настройки и калибровки этих устройств. Выделены перспективные направления развития МЭМС-гироскопов с акцентом на применение микрооптоэлектромеханических преобразователей и сегнетоэлектрических пленок.

Выводы. На основе проведенного анализа показана перспективность развития МЭМС-гироскопов, несмотря на имеющиеся технологические вызовы. Отмечено, что новые физические принципы и уникальные технологии могут способствовать появлению новых видов МЭМС-гироскопов, использующих микрооптоэлектромеханические преобразователи и сегнетоэлектрические пленки. Это, в свою очередь, открывает новые горизонты для будущих разработок в данной области. Показана необходимость разработки новых технологий производства и специализированного оборудования для повышения качества МЭМС-гироскопов.

Ключевые слова: МЭМС-гироскоп, микросистемная техника, технология создания, оборудование производства, микрооптоэлектромеханический преобразователь, оптический туннельный эффект, фотоника, сегнетоэлектричество

Для цитирования: Кузнецов П.С. Микроэлектромеханические системы: путь к совершенствованию гироскопов. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):103–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>, <https://www.elibrary.ru/KBLENU>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Microelectromechanical systems for improved gyroscope design

Pavel S. Kuznetsov [@]

State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, 129226 Russia

[@] *Corresponding author, e-mail: ps_kuznetsov@mail.ru*

• **Submitted:** 31.10.2024 • **Revised:** 13.02.2025 • **Accepted:** 21.03.2025

Abstract

Objectives. Microsystem engineering is currently receiving a great deal of research attention due to the very wide scope of application of its various elements. The present study of the development and creation of modern gyroscopes based on microelectromechanical systems (MEMS gyroscopes) analyzes the risks associated with the technological aspects of their production and identifies promising areas for further development both of MEMS gyroscopes themselves and the technologies used to manufacture them.

Methods. A detailed analysis of existing scientific publications, analytical reviews, and other available sources on MEMS gyroscopes and current trends in the field of microoptoelectromechanical technologies and ferroelectric films was carried out.

Results. A brief description of the design solutions of modern MEMS gyroscopes and their integration into mechatronic systems is presented. The production technologies of MEMS gyroscopes and specifics of the technological equipment used are considered. A separate section discusses the configuration and calibration aspects of these devices. Promising directions for the development of MEMS gyroscopes with an emphasis on the use of microoptoelectromechanical converters and ferroelectric films are highlighted.

Conclusions. Based on the analysis, the prospects for the development of MEMS gyroscopes are shown, despite the existing technological challenges. It is noted that new physical principles and unique technologies can contribute to the emergence of new types of MEMS gyroscopes using micro-optoelectromechanical converters and ferroelectric films. This, in turn, opens up new horizons for future developments in this area. The necessity of developing new production technologies and specialized equipment to improve the quality of MEMS gyroscopes is demonstrated.

Keywords: MEMS gyroscope, microsystem technology, creation technology, production equipment, microoptoelectromechanical converter, optical tunneling effect, photonics, ferroelectricity

For citation: Kuznetsov P.S. Microelectromechanical systems for improved gyroscope design. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):103–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>, <https://www.elibrary.ru/KBLENU>

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Микросистемная техника является одним из наиболее популярных и перспективных направлений, которые развиваются в настоящее время. Область применения элементов микросистемной техники весьма широка. Это датчики первичной информации электрических и неэлектрических величин, микро-моторы и различные элементы авионики, а также и медицинские микроинструменты.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) и МЭМС-гироскопы, в частности, являются наиболее востребованным направлением микросистемной техники [1]. Назначение МЭМС-гироскопа заключается в определении параметров движения систем и приборов, в которых они установлены. Малые габаритные размеры и низкое энергопотребление делают их привлекательными для использования во многих отраслях, таких как автомобильная техника, робототехника, мобильные телефоны и многие другие. Их использование в системах специального назначения (беспилотные летательные аппараты, управляемые снаряды, инерциальные навигационные системы и т.д.) определяет повышенные требования к характеристикам и технологии создания МЭМС-гироскопов [2–6].

Целью работы является исследование процесса создания МЭМС-гироскопов, анализ его особенностей, а также определение перспективных направлений развития МЭМС-гироскопов и методов их производства.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННЫХ МЭМС

Микросистемная техника представляет собой совокупность научно-технических и технологических способов, обеспечивающих создание в объеме и (или) на поверхности твердого тела упорядоченной композиции микронных и субмикронных областей материалов с заданным составом, структурой и геометрией. Это обеспечивает реализацию функций восприятия, преобразования, хранения, обработки, трансляции информации, энергии, движения и выработки управляющих воздействий в требуемых режимах и условиях эксплуатации [7].

Микроэлектромеханическая система представляет из себя систему, в которой объединены микроэлектронные и микромеханические элементы (рис. 1). Данные устройства с помощью механических элементов преобразуют внешнее воздействие в электрический сигнал (гироскопы, акселерометры, датчики давления и т.д.) или под действием электрических сил сами совершают движения [8].



Рис. 1. Схема МЭМС [8]

МЭМС-гироскоп – это микроминиатюрная электромеханическая система, в которой энергия первичных (вынужденных) колебаний инерционной массы под воздействием внешней угловой скорости преобразуется в энергию вторичных колебаний, на основе которых получают информацию об измеряемом воздействии [9–11].

Таким образом, простейший гироскоп на основе МЭМС должен состоять из двух основных функциональных элементов: датчика угловой скорости (ДУС) и сервисной электроники, которая воспринимает, усиливает и обрабатывает сигнал с емкостного выхода датчика, а также управляет работой микромеханической структуры. Рассмотрим, что конструктивно представляют из себя эти два элемента, а также как они располагаются в сборке.

Большинство МЭМС-гироскопов относятся к гироскопам вибрационного типа. В зависимости от типа инерционной массы все конструкции микромеханических датчиков (ММД), используемых в гироскопах, можно разделить на несколько основных видов, представленных на рис. 2 [12, 13].

Первый тип – это балочные инерционные массы. Принцип их действия заключается в следующем: пьезоэлементы придают колебательные движения консольной балке в направлении оси X (рис. 3). Вращение относительно оси Z , направленной параллельно продольной оси балки, вызывает под действием силы Кориолиса колебания вдоль оси Y , которые регистрируются другими пьезоэлементами [14].

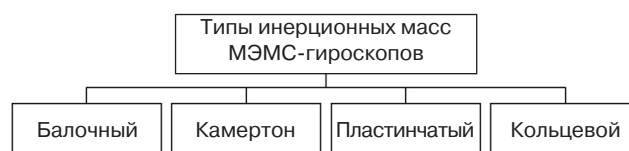


Рис. 2. Типы инерционных масс МЭМС-гироскопов

Второй тип инерционных масс – это камертоны, названные так из-за особенности конструкции резонатора. Построенные на таком принципе гироскопы работают достаточно просто (рис. 4): вращение вокруг вертикальной оси заставляет массы, колеблющиеся до этого в противофазе в одной плоскости, совершать колебания в плоскости, перпендикулярной первичным колебаниям. Детектирование вторичных колебаний осуществляется с помощью емкостных

датчиков, в результате чего получают информацию об угловой скорости [14].

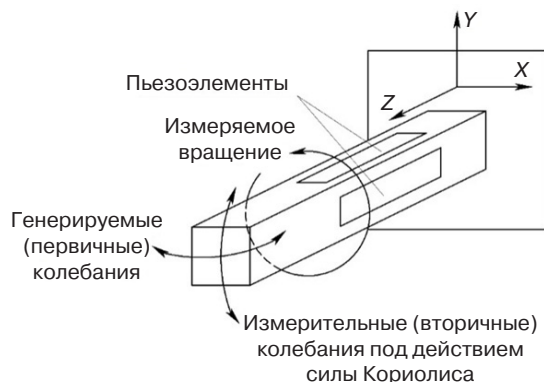


Рис. 3. Принцип действия балочного гироскопа

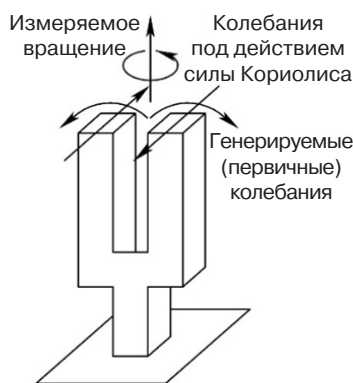


Рис. 4. Принцип действия гироскопа-камертона

Из-за наличия вертикальных колебаний данные гироскопы невозможно изготавливать с помощью планарной технологии, что мешает их массовому производству.

Следующий тип гироскопов – это гироскопы с пластинчатыми инерционными массами [9–11, 15]. В зависимости от вида движения первичных и вторичных колебаний инерциальных масс гироскопы бывают L-L-типа (linear-linear), R-R-типа (rotate-rotate) и R-L-типа (rotate-linear), причем, возможны R-L и L-R-комбинации (рис. 5) [15, 16]. Значительных успехов в области создания гироскопов L-L-типа достигла компания Analog Devices (США), которая создала технологию iMEMS (интегрированные МЭМС) [5]. МЭМС-гироскоп данного типа (рис. 6) работает следующим образом. Инерционные массы 1, подвешенные через двумерные пружины 2, раскачиваются в противоположных направлениях (противофазно), совершая первичные колебания. Пружины 2 обеспечивают перемещение инерционных масс в двух направлениях посредством электростатического датчика силы. При появлении угловой скорости возникают силы Кориолиса, которые заставляют двигаться инерционные массы в направлении, перпендикулярном направлению первичных

колебаний, также противофазно. Инерционные массы заставляют перемещаться гребенки съема, связанные с ними через двумерные пружины 2 и повешенные на одномерных пружинах 4, которые позволяют перемещаться гребенкам съема только в одном направлении. Гребенки съема связаны между собой по дифференциальной схеме, что позволяет получить на выходе сигнал, эквивалентный действующей угловой скорости.



Рис. 5. Типы МЭМС-гироскопов с инерционной массой

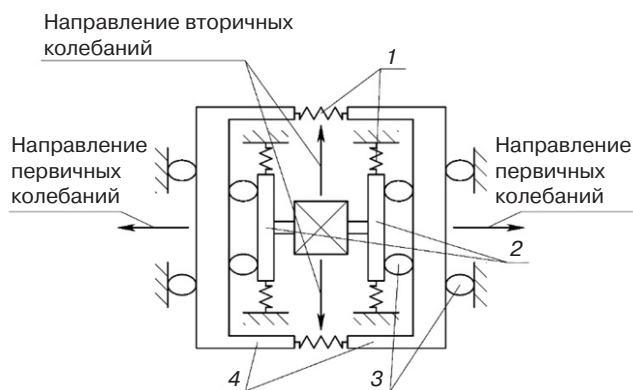


Рис. 6. Принцип действия гироскопа L-L-типа:
1 – одномерные пружины, 2 – гребенки съема, 3 – двумерные пружины, 4 – инерционные массы

Следующий тип МЭМС-гироскопов – это гироскоп R-R-типа. Его принципиальная схема представлена на рис. 7. Инерционная масса (ротор) относительно анкеров, установленных на подложке (основании), имеет подвес, включающий в себя упругие и промежуточные элементы. Электростатический привод вызывает первичные колебательные движения ротора вокруг оси Z. При появлении переносной угловой скорости Ω_x основания переменный гироскопический момент вызывает вторичные колебания ротора вокруг оси Y, что и детектируется емкостными измерителями перемещений [9–11, 17, 18].

Последний тип МЭМС-гироскопов – это гироскоп R-L-типа. По конструкции (рис. 8) он представляет из себя камертон, реализованный в виде двух инерционных масс, закрепленных с помощью упругих элементов по внешней рамке. Сама рамка связана с основанием через упругие элементы, обеспечивающие ей вращательное движение вокруг оси. Электростатический двигатель, выполняемый

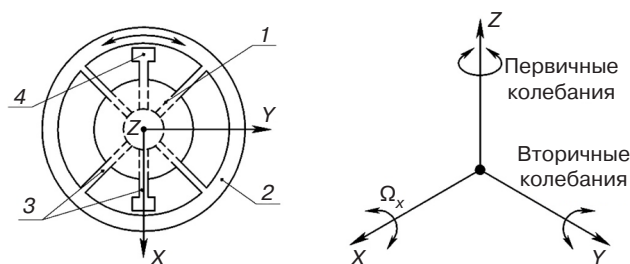


Рис. 7. Принцип действия гироскопа R-R-типа:
1 – промежуточный (кинематический) элемент подвеса, 2 – роотор, 3 – упругие элементы подвеса, 4 – анкер

в виде «гребенчатой» структуры, возбуждает противофазные поступательные колебания масс. При наличии угловой скорости Ω , вектор которой совпадает с измерительной осью вращения рамки, возникают кориолисовы силы, создающие переменный момент, приводящий к угловым колебаниям рамки вокруг оси с частотой, равной частоте двигателя. Амплитуда колебаний рамки является мерой измеряемой угловой скорости. Измерение колебаний рамки осуществляется с помощью емкостного датчика, электроды которого расположены на основании под инерционными массами.

Кольцевой МЭМС-гироскоп представляет из себя частный случай ДУС с распределенными параметрами. Кольцевой резонатор совершает колебания в направлении, соответствующем основной колебательной моде. При воздействии угловой скорости (повороте кольца) ориентация колебательной моды относительно самого кольца изменяется. Это связано со стремлением сохранить свою ориентацию под действием силы инерции, вызванной ускорением Кориолиса [11]. По сути, кольцевой МЭМС-гироскоп является одним из видов волнового твердотельного гироскопа.

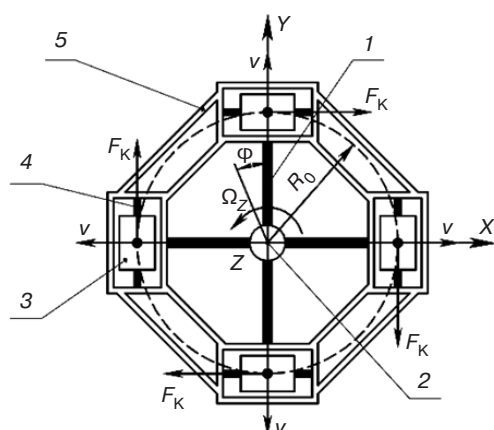


Рис. 8. Принцип действия гироскопа R-L-типа: 1 – упругие элементы подвеса вторичных колебаний, 2 – анкеры, 3 – инерционная масса, 4 – упругие элементы подвеса первичных колебаний, 5 – жесткие элементы подвеса. F_K – вектор силы Кориолиса, v – вектор скорости, ϕ – угол поворота чувствительного элемента (ЧЭ)

Среди множества существующих технологий изготовления ММД, входящих в МЭМС-гироскопы [5, 10, 11, 15, 16], рассмотрим подробнее технологию «кремний на стекле». Микромеханические датчики, изготовленные по данной технологии, представляют из себя вакуум-плотную капсулу, в которой выводы от элементов кремниевой структуры выведены герметично через металлизированные отверстия в стекле и заканчиваются на поверхности контактными площадками. Внутри капсулы находится в вакууме микромеханическая кремниевая структура, представляющая собой вибрационный микрогироскоп. Конструкция ММД в капсульном исполнении представлена на рис. 9.

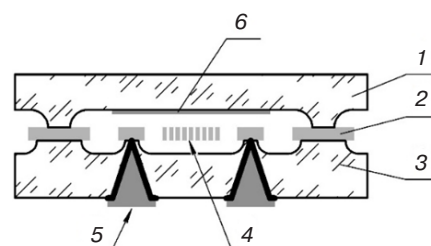
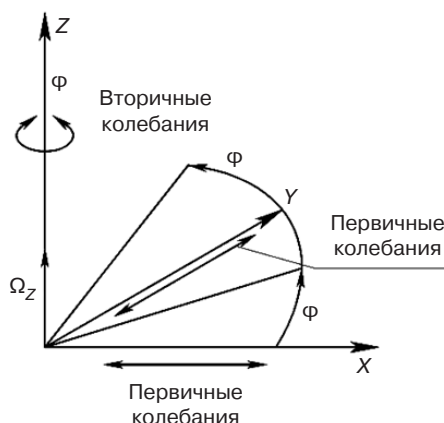


Рис. 9. Конструкция ММД в капсульном исполнении:
1 – крышка, 2 – рамка основания (Si), 3 – основание, 4 – кремниевая структура, 5 – контакты (Al), 6 – геттер (Ti)

Существует несколько вариантов конструктивного изготовления ММД и сервисной электроники. Самым малогабаритным и технологически трудоемким является вариант, при котором датчик и микросхема располагаются на одном кристалле и герметизируются в одном корпусе. Другой вариант представляет собой конструкцию, аналогичную предыдущей, в которой элементы выполняются на двух различных кристаллах. При этом получившийся МЭМС-гироскоп используется как самостоятельный



элемент. Третий вариант исполнения предполагает отдельное капсулирование датчика и отдельное корпусирование микросхемы, после чего они располагаются на коммутационной плате совместно с другими элементами системы. Четвертым вариантом, наиболее удобным с точки зрения последующего использования, является конструкция, при которой бескорпусной капсулированный датчик и интегральная схема монтируются на коммутационной плате и размещаются в одном герметизируемом корпусе как отдельные элементы.

Среди возможных вариантов конструктивного исполнения ММД технология «кремний на стекле» обладает следующими положительными чертами:

- 1) технология наиболее близка к технологии кремниевой микроэлектроники и поэтому хорошо освоена;
- 2) технология обладает возможностью группового изготовления;
- 3) используемые при производстве кремниевые и стеклянные пластины выпускаются промышленностью;
- 4) под данную технологию выпускается специализированное оборудование, которое постоянно модернизируется и совершенствуется;
- 5) технология позволяет изготавливать ММД различных типов;
- 6) готовый капсулированный элемент представляет собой самостоятельный элемент монтажа, что дает возможность проводить отдельно контроль его параметров, тем самым снижая выход бракованных МЭМС-гироскопов.

Перейдем к конструкции всего МЭМС-гироскопа в конечном исполнении, который представляет из себя интеграцию капсулированного ММД и интегральной схемы сервисной электроники.

Существует несколько вариантов взаимного расположения капсулы и микросхемы. Первый вариант – это классическое планарное расположение, т.е. микромеханический преобразователь и схема сервисной электроники расположены рядом. Второй вариант исполнения представляет из себя двухъярусное размещение, т.е. в специальном корпусе внизу располагается микросхема, а наверху – капсулированный элемент. Этот вариант имеет преимущество перед первым вариантом из-за уменьшения размеров конечного изделия при небольшом увеличении высоты. Однако для него также требуется конструирование специального корпуса, что усложняет производство.

Третий вариант предполагает установку микромеханического преобразователя непосредственно на интегральную микросхему. Недостатком этой конструкции является риск повреждения микросхемы при монтаже на нее капсулы. Другие варианты конструкции невозможны из-за необходимости размещения микросхемы на дне для отвода тепла [19].

Рассмотрим подробнее второй вариант с точки зрения возможности изготовления опытных и серийных образцов МЭМС-гироскопов. Доработанный вариант (рис. 10) с добавлением промежуточной керамической платы для монтажа микромеханического преобразователя и осуществления его электрической коммутации с микросхемой имеет следующие преимущества:

- 1) возможность контроля всех составных элементов МЭМС-гироскопа перед окончательной сборкой;
- 2) возможность установки на коммутационную плату микромеханических преобразователей различных конструкций и размеров;
- 3) возможность замены капсулы датчика;
- 4) герметизация корпуса, обеспечивающая защиту от внешних воздействующих факторов микросхемы в бескорпусном исполнении и микромеханического преобразователя [20, 21].

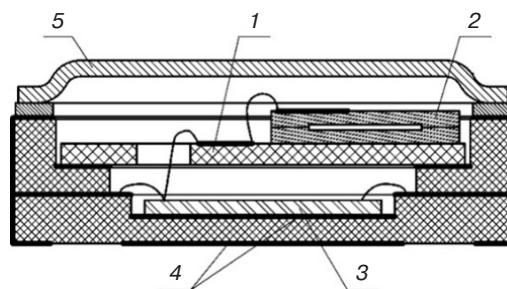


Рис. 10. Конструкция МЭМС-гироскопа:

1 – коммутационная плата,
2 – капсулированный ММД, 3 – интегральная схема,
4 – металлизация, 5 – крышка [8]

МЭМС-ГИРОСКОПЫ – КЛАСС МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Мехатроника – это область науки и техники, в основе которой лежит синергетическое объединение механики, электроники и управляющей вычислительной системы с целью проектирования и создания принципиально новых систем и модулей с интеллектуальным управлением их функциональным движением [8, 22–25]. На рис. 11 представлено схематическое изображение данного определения. По сути, МЭМС – это мехатронный узел, в котором отсутствует система управления.

Более подробное изучение конструкции МЭМС-гироскопа, в состав которого входит сервисная электроника, дает возможность говорить о нем, как о мехатронной системе. Проведем анализ изделий разработки АО «ГИРООПТИКА»¹ (Россия), представленных на рис. 12 [14, 26–31]. На рис. 13 изображена

¹ <http://gyro.ru/>. Дата обращения 22.03.2025. / Accessed March 22, 2025.

структурная схема микромеханического преобразователя угловой скорости. Как можно заметить, кроме основного ММД угловой скорости в представленный датчик еще входит дополнительный ММД линейного ускорения (акселерометр), а сервисная электроника представлена микросхемой ASIC², производства АО «ГИРООПТИКА».



Рис. 11. Схема мехатронной системы [8]

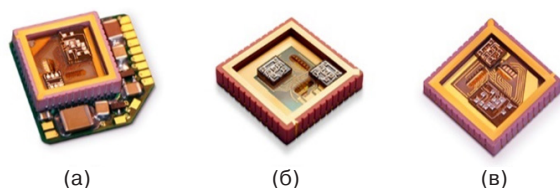


Рис. 12. Микромеханические преобразователи производства АО «ГИРООПТИКА»: (а) угловой скорости, (б) линейного ускорения, (в) комплексный преобразователь

Акселерометр в представленном МЭМС-гироскопе необходим для измерения линейного ускорения и последующей компенсации ММД угловой скорости к ускорениям.

Назначение микросхемы ASIC – это усиление, прямое цифровое преобразование

сигнала с выходов ММД угловой скорости и линейного ускорения, цифровое формирование выходных сигналов МЭМС-гироскопа и управляющих сигналов для ММД. Кроме того, в микросхему встроен процессорный блок с постоянным запоминающим устройством (ПЗУ), который обеспечивает возможность индивидуальной настройки и калибровки каждого ДУС с учетом технологического разброса параметров и их температурной зависимости. С помощью процессорного блока производится настройка ММД (подстройка частоты собственных колебаний ММД по измерительной оси относительно частоты вынужденных колебаний), коррекция нелинейности масштабного коэффициента и смещения нуля. Компенсация технологического разброса параметров и их температурной зависимости и чувствительности к перегрузке вдоль выходной оси ММД угловой скорости рассчитывается в соответствии с записанными в ПЗУ данными с учетом сигнала встроенного в микросхему термодатчика с собственным аналого-цифровым преобразователем и ММД линейного ускорения.

Комплексный микромеханический преобразователь (рис. 12в) по структуре схож с преобразователем угловой скорости, но информация о линейном ускорении используется не только для внутренней коррекции, но и выдается внешнему потребителю.

Таким образом, это вполне готовая мехатронная система, способная выполнять определенные задачи. Дальнейшее развитие микросистемной техники при использовании принципов мехатроники может привести к созданию высокоинтеллектуальных микромехатронных систем: интегральная микросхема будет управлять всей системой, микромеханические приборы станут, с одной стороны, контролировать и распознавать происходящие вокруг процессы, а, с другой стороны, станут микроминиатюрными исполнительными механизмами. Первые образцы микромехатронных роботов уже существуют [8, 25, 32, 33].

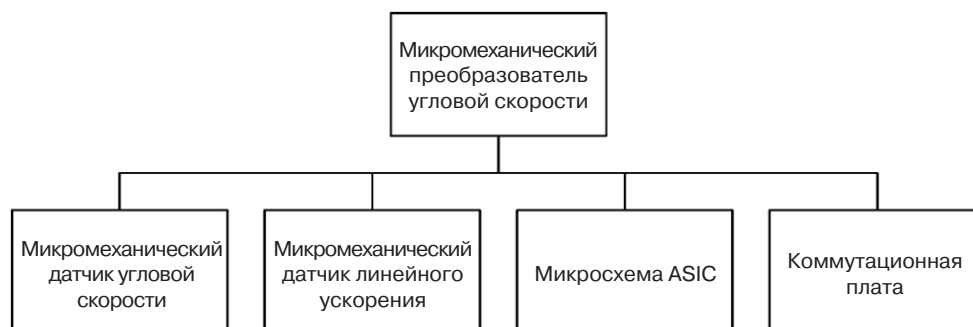


Рис. 13. Структурная схема микромеханического преобразователя угловой скорости

² Application-specific integrated circuit – интегральная схема для конкретного применения.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЭМС-ГИРОСКОПОВ

Производство МЭМС-гироскопа можно разделить на 4 основных процесса:

- 1) изготовление ММД в капсульном исполнении;
- 2) изготовление интегральной микросхемы, которая осуществляет обработку сигнала и управление ММД;
- 3) изготовление коммутационной платы;
- 4) сборка готового изделия.

Определяющими и наиболее сложными процессами при создании МЭМС-гироскопов являются изготовление ММД и управляющей интегральной микросхемы. Все это требует наличия специального оборудования. Процесс изготовления ASIC технологически отработан и является во многом типовым. Остановимся более подробно на производстве капсулированного ММД [34].

В основе технологии его изготовления лежит групповая технология объемной микромеханики с глубоким плазмохимическим травлением кремния и анодным соединением кремниевых и стеклянных пластин, по причине того, что конструкция требует герметичного соединения между ними. Исходными материалами в этой технологии служат кремниевые пластины с двухсторонней полировкой и стеклянные пластины такого же диаметра.

Стеклянная пластина подвергается предварительной обработке, в результате которой методом микроабразивной обработки в ней создаются сквозные отверстия для контактов в нижней пластине, а также формируются выемки глубиной порядка 50 мкм в верхней пластине. После этого на верхнюю пластину напыляют геттер, необходимый для поддержания вакуума во внутреннем объеме ММД.

Кремниевые пластины также проходят предварительную подготовку. Конструктивно необходимая толщина кремния составляет от 50 до 70 мкм. Промышленным способом такие пластины не изготавливаются из-за нестандартного размера, кроме того, требуется большая осторожность при работе с ними. В связи с этим обычно используют или стандартные кремниевые пластины (толщина 100–500 мкм для диаметра 100 мм), или пластины «кремний на изоляторе» с толщиной рабочего слоя 70 мкм и опорного кремния 500 мкм. Это позволяет использовать стандартное оборудование при обработке кремния.

На первом этапе технологического цикла производства на кремниевых пластинах проводят операции фотолитографии и глубокого плазмохимического травления кремния с целью формирования на пластине двухсторонних знаков совмещения. Следующим шагом является плазмохимическое травление полостей в кремнии. В этом процессе

в качестве маски используется оксид кремния, по которому делают фотолитографию с последующим травлением. Далее проводится плазмохимическое травление кремния на глубину 20 мкм. И хотя линейные размеры в данном рабочем слое не являются критическими, важно получить хорошую равномерность по глубине в процессе травления. После формирования структуры производится удаление оксида кремния и очистка поверхности перед операцией анодного соединения. В результате последнего процесса соединяется стеклянная пластина с отверстиями и пластина кремния. На данном этапе важно контролировать давление газа в полости, поскольку и низкий вакуум, и высокое избыточное давление могут привести к разрушению слоя кремния при последующей операции его утонения.

Суть технологического процесса утонения кремния заключается в формировании из исходной кремниевой пластины слоя кремния общей толщиной 70 мкм. После процесса утонения кремния следует операция проекционной фотолитографии. На этом шаге происходит формирование рисунка со структурой в слое кремния.

Следующая после проекционной фотолитографии операция глубокого плазмохимического травления также является ключевой, поскольку в ходе нее и формируется большая часть структуры ММД. Глубина травления составляет 50 мкм, а минимальный зазор – 2 мкм, что определяет максимальное аспектное соотношение как 1:25. Неравномерность травления, уход геометрических размеров в одну или другую сторону, наклон и шероховатость стенок – все это сказывается на качестве функционирования ММД, а большие отклонения от заданных величин могут привести к значительному ухудшению его характеристик вплоть до брака.

В процессе травления происходит формирование всех основных структур ММД, включая подвижные части и упругих элементов. С этого момента из технологического процесса должны быть исключены любые операции, которые могут повредить структуру, включая операции нанесения фоторезиста и жидкостной обработки пластин.

Следующая операция технологического процесса заключается в анодном соединении верхней стеклянной пластины с кремниевым основанием. На этом этапе происходит герметизация структуры на уровне пластины. При этом необходимо поддерживать заданный уровень вакуума в объеме ММД, что достигается за счет термической активации тонкопленочного геттера, напыленного на стекло. В процессе герметизации изделия путем анодного соединения происходят два противоположных процесса: выделение кислорода из стекла и его поглощение геттером при повышенной температуре.

Последние операции технологического процесса, которые проводятся на уровне пластин, заключаются в создании внешней металлизации. На этом этапе происходит напыление толстого слоя алюминия, который покрывает кремниевые контактные площадки на дне сквозных отверстий в стекле, а также боковые стенки этих отверстий с выводом металлизации на поверхность стекла.

Следующим этапом является резка пластин на кристаллы, которая производится при помощи установки дисковой резки пластин в два прохода. После этого пластина передается на функциональный контроль. Те чипы, которые успешно проходят тест на функционирование, передаются на следующие этапы для установки их в корпус и дальнейшей сборки преобразователя.

Рассматривая такую технологию, важно отметить, что процессы анодного соединения с предварительным совмещением соединяемых пластин (двухстороннее совмещение) и процесс сухого или глубокого плазмохимического травления кремния являются процессами, которые невозможно выполнить на типовом оборудовании производств, осуществляющих выпуск интегральных микросхем и/или полупроводниковых приборов. Остальные процессы, в принципе, возможно провести на стандартном оборудовании с соответствующими изменениями в режимах и применяемых материалах. Это касается процессов химических обработок, фотолитографических процессов, вакуумных нанесений покрытий, разделения пластин на кристаллы и др. Этому также способствует использование для изготовления микромеханических элементов стеклянных и кремниевых пластин, имеющих стандартные для полупроводниковых производств размеры (толщины и диаметр).

Изготовленные капсулированные ММД после разделения на отдельные кристаллы кроме визуального контроля проверяются на резонансные частоты и добротность. Это дает возможность провести отбраковку не только по разности выходной и входной частоты, но и по наличию необходимого вакуума внутри капсулированного элемента. Такой контроль позволяет значительно сократить трудоемкость и повысить процент выхода годных изделий на операциях сборки и настройки МЭМС-гироскопа. Здесь следует отметить, что полностью исключить плохо работающие ММД угловой скорости на ранних стадиях изготовления невозможно, т.к. требуется подключение ММД к обрабатываемой электронике и его настройка, включающая механические воздействия в виде вращений и поворотов.

Сборка МЭМС-гироскопа осуществляется путем 3D-интеграции бескорпусной интегральной микросхемы и капсулированного ММД с использованием

керамической коммутационной платы в специальный металлокерамический корпус. Интеграция осуществляется последовательным монтажом элементов в корпус с последующим их взаимными соединениями микропроволокой по методу «шарик-клин».

Монтаж кристалла ASIC, коммутационной платы и капсулированного элемента осуществляется с помощью проводящего клея, применяемого в микроэлектронике.

Герметизация корпуса осуществляется пайкой керамической крышки к основанию корпуса, проверка герметичности проводится с помощью гелиевого течеискателя по методике и критериям, применяемым для микросхем в металлокерамических корпусах.

Операции настройки и калибровки преобразователей проводятся для того, чтобы обеспечить работоспособность изделия с заданными техническими характеристиками.

ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА МЭМС-ГИРОСКОПОВ

Выбор в пользу технологий «кремний на стекле» или «кремний на изоляторе», сделанный в предыдущих разделах, основывался, в т.ч. и на возможности использования в технологии изготовления гироскопов промышленного оборудования. Так как выбранные технологии можно разделить на две части: технологии, перешедшие из микроэлектроники и технологии, которые присущи только изготовлению микромеханических устройств, то оборудование, обеспечивающее соответствующие технологические процессы, делится на две группы. Оборудование первой группы выпускалось промышленностью СССР, в дальнейшем – странами СНГ. Сегодня на этом рынке доминируют иностранные производители из различных стран и регионов.

Существуют широкие возможности для подбора ручного, полуавтоматического или автоматического оборудования для стандартных процессов микроэлектроники, таких как вакуумное напыление, операций фотолитографии, химических обработок, термического окисления и т.д. Особого внимания заслуживает оборудование, предназначенное для специальных процессов в рамках выбранной технологии объемной микромеханики и технологий «кремний на стекле». К таким процессам следует отнести:

- глубокое плазмохимическое травление кремния и стекла;
- двухстороннее соединение кремниевых и стеклянных пластин;
- анодное соединение кремниевых и стеклянных пластин без потери точности совмещения;
- утонение кремния на стекле.

Здесь следует заметить несколько особенностей оборудования для МЭМС:

- специализированное оборудование для операций микромеханики является высокоточным и очень дорогостоящим и выпускается производителями только под заказ и под конкретную технологию и требования заказчика;
- одно и то же в своей основе оборудование, как правило, выпускается в двух модификациях. Первая – это вариант ручного или полуавтоматического оборудования, предназначенного для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, мелкосерийного производства или пилотных производств. Вторая модификация – автоматическое оборудование с загрузкой через кассеты, предназначенное для производства;
- оборудование выпускается также в кластерном варианте для объединения с установками, осуществляющими смежные операции, т.е. для создания кластера, осуществляющего автоматически целый цикл операций;
- большинство производителей в последнее время вместе с оборудованием стали предлагать и технологию, и все производители в стоимость включают пуско-наладочные работы и обучение персонала [35].

Независимо от осуществляемого технологического процесса с его конкретными особенностями, основным требованием к оборудованию производства элементов и устройств микроэлектроники и микромеханики является его способность производить с наименьшим процентом брака.

Требования к уровню привносимых загрязнений и составу остаточной газовой среды внутри рабочей камеры играют важную роль как при производстве микроэлектроники (рис. 14а – замыкание соседних дорожек), так и при производстве микромеханики (рис. 14б – микрочастица блокирует движение). На рис. 15 представлена структура оборудования высоких технологий, где средства откачки и элементы ввода движения в вакуум позволяют создавать и поддерживать сверхчистую вакуумную среду. Кроме того, они имеют способность защищать технологический объем от частиц и загрязнений, создаваемых другими элементами вакуумной системы. Связано это в первую очередь с тем, что криогенные средства откачки вообще не имеют движущихся элементов, а устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием не имеют трущихся элементов. Принципиальные их особенности и основные свойства представлены в многочисленной специальной литературе [36–41].

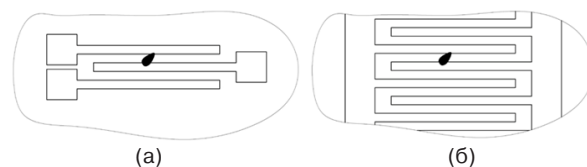


Рис. 14. Попадание микрочастиц на поверхность изделий:
(а) замыкание соседних дорожек микросхемы,
(б) блокировка движения гребенок микромеханики

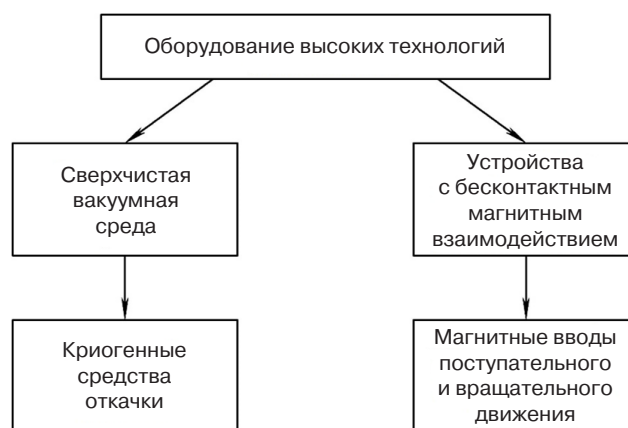


Рис. 15. Структура экологичного оборудования высоких технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЭМС-ГИРОСКОПОВ

Функциональное назначение МЭМС определения угловой скорости (МЭМС-гироскопа) – преобразование неэлектрических физических величин (угловой скорости) в электрический измерительный сигнал, содержащий количественную информацию о воздействующей угловой скорости.

Основными параметрами, определяющими функциональное назначение и область применения, являются:

- диапазон измерения угловых скоростей;
- разрешающая способность;
- нелинейность масштабного коэффициента.

Основной технической характеристикой МЭМС-гироскопа является выходная (преобразовательная) характеристика, т.е. зависимость выходного сигнала от значений определяемых угловых скоростей в пределах диапазона измерения. Выходная характеристика используется в преобразовательном канале МЭМС-гироскопа, который является информационным каналом, обеспечивающим выработку информации о проекциях угловой скорости на оси чувствительности ДУС и передачу этой информации потребителю в соответствии с протоколом информационного обмена.

Поэтому необходимо учитывать погрешности выходных характеристик МЭМС-гироскопов,

которые могут возникнуть при их производстве. Погрешности делятся на две категории: основные погрешности и дополнительные погрешности. Основные погрешности определяются при нормальных условиях, т.е. при отсутствии внешних воздействующих факторов. К ним относятся нелинейность и нестабильность выходных характеристик.

Нестабильность выходной характеристики включает нестабильность смещения нуля и нестабильность масштабного коэффициента МЭМС-гироскопа.

Дополнительные погрешности возникают под воздействием внешних факторов, таких как температура окружающей среды, механические воздействия и т.д. Наибольшее влияние оказывает температурная погрешность выходной характеристики. Причина этого в том, что ММД МЭМС-гироскопов представляют собой сложную трехслойную структуру и имеют температурную зависимость своих параметров. Это, прежде всего, связано с тем, что измерительные зазоры в конденсаторах, выполненных из кремния, составляют значения 2–3 мкм, а регистрируемые минимальные перемещения имеют значения менее нанометра. При столь малых значениях и сложности микромеханической структуры даже применение дифференциальных методов измерений не позволяет исключить влияние температуры [42, 43].

Вообще температурной зависимостью обладает не только микромеханический элемент, но и электроника, обрабатывающая сигнал с емкостных датчиков и управляющая работой гироскопа. Поэтому возникает необходимость проведения настройки и калибровки МЭМС-гироскопа.

Настройка МЭМС-гироскопа является необходимой операцией для получения стабильных параметров выходной характеристики. Заключается она в задании и стабилизации в температурном диапазоне полосы пропускания и масштабного коэффициента МЭМС-гироскопа. Кроме этого, в процессе настройки определяется и компенсируется температурный дрейф смещения нуля.

Настройка проводится в климатической камере на опорно-поворотном стенде. С помощью климатической камеры задается температура в соответствии с требованиями. Опорно-поворотный стенд автоматически обрабатывает заданный набор угловых скоростей для определения масштабных коэффициентов. Для измерения температуры используется встроенный в МЭМС-гироскоп термодатчик.

Результатом настройки являются зависимости коэффициентов, отвечающих за полосу пропускания и масштабный коэффициент от показаний встроенного термодатчика. Эти зависимости, представленные в табличном (матричном) виде, используются программой управления в алгоритме кусочно-линейной аппроксимации, который вычисляет значения

коэффициентов для любого показания встроенного термодатчика.

После того, как в программу управления добавлена зависимость коэффициентов от температуры, определяется температурный дрейф смещения нуля.

Настройка МЭМС-гироскопа всегда предшествует градуировке и предназначена для обеспечения работоспособности его в диапазоне рабочих температур и угловых скоростей. В результате выполнения настройки МЭМС-гироскоп имеет технические параметры, близкие к требуемым. Окончательная доводка параметров осуществляется при градуировке.

Калибровка МЭМС-гироскопа проводится с целью определения выходных характеристик преобразовательных каналов угловой скорости в нормальных условиях (основные погрешности) и при воздействии внешних факторов (дополнительные погрешности). Точная калибровка во всем температурном диапазоне чаще всего проводится во время окончательной настройки и калибровки инерциального измерительного блока (ИИБ), в который МЭМС-гироскопы устанавливаются. Поскольку контроллер ИИБ обычно намного мощнее интегральной схемы управляющей электроники датчика, в нем осуществляется алгоритмическая компенсация всех погрешностей МЭМС-гироскопов и ИИБ.

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЭМС-ГИРОСКОПОВ

Компенсация погрешностей датчиков для нормальных условий и для каждой из температур рабочего диапазона, при которых проводится калибровка, осуществляется в контроллере ИИБ с помощью специальной программы управления, в которой используются алгоритмы компенсации погрешностей, определенные при проведении калибровки. Эти алгоритмы основаны на использовании температурных зависимостей характеристик МЭМС-гироскопов, оформленных в виде таблиц, полученных в процессе проведения калибровки.

Окончательный вариант таблицы характеристик датчиков получается при моделировании и контроле этих характеристик в специальной программе при проверке выходных характеристик ИИБ. Моделирование проводится с использованием записанных при калибровке файлов и дополнительных замеров, выполненных после калибровки. На основе полученных физических величин из выходных данных блока и их погрешностей при моделировании делается вывод о выполнении или невыполнении требований к параметрам конечного ИИБ.

Компенсация нелинейности, нестабильности и несимметрии выходных характеристик ДУС осуществляется с использованием калибровочных

характеристик, определенных при градуировке в климатической камере в диапазоне рабочих температур ИИБ и во всем диапазоне измерения угловой скорости от ± 0.01 град/с до максимального значения согласно документации.

Выходные характеристики ДУС после градуировки в климатической камере представляются в виде кусочно-линейной аппроксимации реальной зависимости выходного сигнала от задаваемого значения угловой скорости для сформированного ряда температур, устанавливаемого в климатической камере.

В результате реализации указанных алгоритмов в выходном сигнале ДУС убирается нелинейность, нестабильность и несимметрия. Тем самым масштабный коэффициент и смещение нуля делаются одинаковыми на всех температурах и при всех угловых скоростях из рабочего диапазона [44–48].

Теперь перейдем к компенсации погрешностей МЭМС-гироскопов, вызываемых вибрацией. При установке ММД на вибрирующее основание на подвижные массы действуют инерционные силы, обуславливаемые виброускорением.

У ММД увеличивается шум выходного сигнала вследствие чувствительности гироскопов к линейной перегрузке из-за конечной жесткости подвеса в синфазном направлении движения подвижных масс и технологической несимметрии подвеса. При несимметричной чувствительности гироскопов к линейному ускорению в случае вибрации может образовываться паразитное смещение их нулевого сигнала. Нелинейность чувствительности к линейному ускорению при действии постоянного ускорения (измеряемого или ускорения свободного падения) приводит к появлению несимметрии чувствительности к наложенному переменному ускорению и, соответственно, к постоянному смещению нуля гироскопов.

Дополнительная компенсация остаточных погрешностей производится алгоритмически. Влияние чувствительности ММД к линейному ускорению снижается путем их градуировки с учетом действующего гравитационного ускорения $1g$ и введения поправочных коэффициентов с привязкой к внешним акселерометрам.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЭМС-ГИРОСКОПОВ

Кроме положительных качеств МЭМС-гироскопов, таких как невысокая стоимость и малые габаритные размеры, есть еще негативные стороны. Данный вид преобразователей характеризуется высокой нестабильностью параметров от запуска к запуску. Смещение нуля МЭМС-гироскопа может

достигать значений, примерно 70 град/ч. Данные особенности, присущие как российским, так и зарубежным образцам, требуют проведения периодических испытаний и перекалибровок, в т.ч. обеспечения возможности проведения самокалибровки каналов в процессе эксплуатации. Все это ограничивает возможность использования МЭМС-гироскопов в аппаратуре специального назначения, требующей высокой точности. Использование их в аппаратуре другого класса может привести к ее усложнению и повышению конечной стоимости.

Точность и стабильность параметров МЭМС-гироскопов, в первую очередь, зависят от того, как происходит детектирование микроперемещений ММД. Чаще всего применяется емкостной съем информации, т.е. при перемещении изменяется емкость между неподвижными и подвижными частями (электродами) ММД, предназначенными для этого. При этом происходит взаимовлияние цепей управления и детектирования полезного сигнала датчика.

Также на точность выходных параметров МЭМС-гироскопа существенное влияние оказывает отношение сигнал/шум. Попытки ликвидировать данную проблему, доработав конструкцию ММД, приводят к возникновению противоречий. Чтобы помехоустойчивость ММД стала выше, необходимо увеличить начальную емкость. Это приводит к увеличению площади электродов и уменьшения зазора между ними, что приводит к увеличению демпфирования подвижных узлов. Для того чтобы это компенсировать, необходимо провести перфорацию кремниевой структуры ММД, что в свою очередь приведет к уменьшению площади электродов, а, следовательно, уменьшится начальная емкость.

Улучшение параметров ММД возможно, если для детектирования микроперемещений использовать оптические технологии. Совместное использование МЭМС и микрооптики может привести к синергетическому эффекту, способному решить многие проблемы. Микрооптоэлектромеханический (МОЭМ) преобразователь представляет собой миниатюрное устройство, которое осуществляет измерение и последующую обработку оптического сигнала при возникновении перемещений инерционной массы.

В последнее время в измерительных устройствах для съема информации все чаще стали применять возможности оптического туннельного эффекта. В его основе лежит процесс, при котором происходит проникновение света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду при условии полного внутреннего отражения от границы раздела сред. При этом в оптически менее плотной

среде возникает электромагнитное поле, экспоненциально затухающее по нормали к границе раздела на расстояние, равное длине волны источника излучения. Приборы, построенные на оптическом туннельном эффекте, имеют высокую разрешающую способность, низкую температурную погрешность, высокую помехозащищенность [49–53].

Принцип действия первичного преобразователя, выполненного из плавленного кварца, основан на зависимости коэффициента отражения света структурой «среда-зазор-среда» от величины зазора [54]. Угол падения света на границу между первой средой и зазором (воздухом) выбирается таким, что при большой величине зазора происходит полное внутреннее отражение. Если величина зазора сравнима с длиной волны излучения, то его часть проходит (туннелирует) через зазор во вторую среду, и коэффициент отражения структуры «среда-зазор-среда» уменьшается. Таким образом, мощность оптического излучения, отраженного от структуры «среда-зазор-среда», несет информацию о величине зазора и, соответственно, о характере движения объекта.

На рис. 16 представлена принципиальная схема МОЭМ-детектора перемещения. Главным ЧЭ этого устройства является тонкая пластина из кварцевого стекла, на которой с помощью лазера вырезана своего рода «балка». В торец этой пластины направлен лазерный луч, который распространяясь по пластине, передает часть своей энергии на фотоприемники, которые установлены на некотором небольшом расстоянии сверху и снизу от пластины. Под действием внешних сил «балка» изгибается и появляется некоторая разность между величинами энергии, которая передается на фотоприемники, поскольку расстояние до датчиков начинает отличаться (рис. 17). По этой разности и определяют смещение балки [55].

В настоящее время развиваются технологии создания оптических компьютеров и процессоров. Оптические или фотонные вычислители – гипотетические вычислительные устройства, вычисления в которых производятся с помощью фотонов, излучаемыми лазерами или светодиодами. Большинство современных исследований направлено на замену традиционных (электронных) компонентов компьютера на их оптические эквиваленты. Важно, что частота световой волны на несколько порядков выше частоты электрических сигналов и волн, используемых в кремниевой технологии. Кроме того, поскольку длина световой волны мала, то имеется возможность обработки информации с необычайно высокой скоростью.

В большинстве работ по оптическим вычислителям [56–61] для начала обработки информации

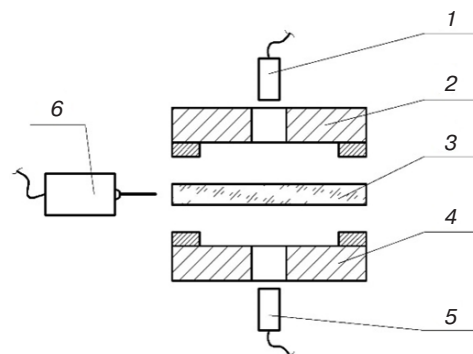


Рис. 16. Принципиальная схема МОЭМ-детектора:
1 – фотоприемник Φ_1 , 2 – крышка корпуса,
3 – кварцевая пластина (ЧЭ), 4 – основание корпуса,
5 – фотоприемник Φ_2 , 6 – лазерный источник [55]

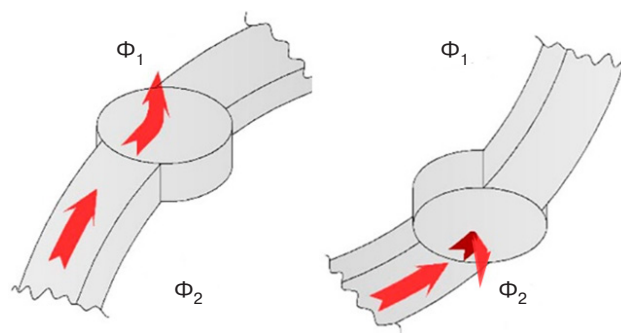


Рис. 17. Снятие показаний с ЧЭ датчика [55]

требуется ее перевод в оптический сигнал. В конструкции МОЭМ-детектора, представленного выше (рис. 16), есть два фотоприемника для съема информации и преобразования в электрический сигнал. Если же лазерное излучение напрямую посылать в приемник оптического сигнала фотонного вычислителя, то получится, что информация о колебаниях ЧЭ до процесса обработки никак не преобразуется, а, следовательно, никак не искажается, что важно для аппаратуры специального назначения.

Использование сегнетоэлектриков и сегнетоэлектрических пленок становится все популярнее в устройствах микроэлектроники, датчиках, исполнительных механизмах и т.д. Большое внимание уделяется применению сегнетоэлектрических структур и в МЭМС [62–66].

Сегнетоэлектриком называется кристаллический диэлектрик, имеющий два или большее число стабильных (или нестабильных) состояний с различной ненулевой электрической поляризацией при нулевом внешнем воздействии (электрическом поле, температуре и т.д.); эту поляризацию называют спонтанной поляризацией [67].

Применение в МЭМС-гироскопах при детектировании перемещений сегнетоэлектрических пленок имеет ряд преимуществ по сравнению

с классическими тензорезистивными и емкостными способами, что может позволить качественно расширить возможности датчиков. Пороговая чувствительность сенсоров динамической деформации на основе сегнетоэлектрических пленок уменьшается до $(\Delta/I) \approx 10^{-9}$. Их использование позволит увеличить чувствительность сенсоров на два порядка по сравнению с существующими аналогами. При этом такие датчики обладают долговременной стабильностью, им не требуется источник стабилизированного напряжения, т.к. они – сенсоры генераторного типа.

Создание подобных сенсоров связано с решением определенных технологических задач. Первая заключается в совмещении технологии создания сегнетоэлектрических пленок с технологией создания кремниевых механических структур. Для решения второй необходимо разработать способы создания устойчивого поляризованного состояния в пленке [63, 68].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянно растущие потребности в производстве МЭМС-гироскопов и других ММД способствуют бурному развитию микросистемной техники. Весь процесс создания конкретного изделия требует постоянного управления, начиная с разработки конструкции, где необходимо точно рассчитать все входящие элементы, и заканчивая настройкой и калибровкой.

Кроме этого, немаловажным фактором при производстве является грамотная организация технологического процесса создания ЧЭ, что включает в себя сами операции, выбор и эксплуатацию специального вакуумного оборудования.

Несмотря на все имеющиеся сложности, появляется все больше разнообразных типов МЭМС-гироскопов, работающих на новых принципах. Это требует разработки прогрессивных технологий их производства, нового специализированного оборудования и методов настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев П.П., Телец В.А. Лекция 13. Микросистемная техника. В кн.: *Базовые лекции по электронике*: в 2-х т. Т. II. *Твердотельная электроника*. М.: Техносфера; 2009. С. 499–575.
2. Peshekhonov V.G. The Outlook for Gyroscopy. *Gyroscopy Navig.* 2020;11:193–197. <https://doi.org/10.1134/S2075108720030062>
3. Damianos D., Mouly J., Delbos P. *Status of the MEMS Industry 2021*. Market & Technology Report; 2021. 10 p.
4. Синельников А.О., Тихменев Н.В., Ушанов А.А., Медведев В.М. Современное состояние и тенденции развития инерциальных навигационных систем на кольцевых лазерных гироскопах. *Фотоника*. 2024;18(6):450–466. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.6.450.466>
5. Robin L., Perlmutter M. Gyroscopes and IMUs for Defense Aerospace and Industrial. *Report by Yole Development*. 2012. 317 p.
6. Пыжова Е.М. Микромеханические гироскопы в системах навигации. В сб.: *Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2019: материалы конференции*. Казань: ИП Сагеева А.Р.; 2019. С. 669–671. <https://www.elibrary.ru/agslgx>
7. Вернер В.Д., Сауров А.Н., Иванов А.А., Телец В.А., Коломенская Н.Г., Лучинин В.В., Мальцев П.П., Попова И.В. Изделия микросистемной техники – основные понятия и термины. *Нано- и микросистемная техника*. 2007;12:2–5.
8. Кузнецов П.С. Вопросы и перспективы развития мехатроники и микросистемной техники. *Нано- и микросистемная техника*. 2024;26(4):159–169. <https://doi.org/10.17587/nmst.25.159-169>
9. Распопов В.Я., Никулин А.В., Лихошерст В.В. Классификация конструкций микромеханических гироскопов. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2005;48(8):5–8.
10. Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С. *Микросистемные датчики физических величин*: монография в двух частях. М.: ТЕХНОСФЕРА; 2018. 550 с.
11. Тимошенко С.П., Михеев А.В., Каменский А.М., Артемов Е.И., Полушкин В.М., Петрова Н.А., Боев Л.Р., Пузиков В.В. Инерциальные микроэлектромеханические системы (акселерометры и гироскопы). *Наноиндустрия*. 2020;(S96-2):471–474. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.471.474>
12. Asar C., Shkel A. *MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness*. Springer; 2009. 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09536-3>
13. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. *Прикладная теория гироскопов*. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор»; 2015. С. 42–46.
14. Шахнович И.В. МЭМС-гироскопы – единство выбора. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2007;1:76–85.
15. Xinfeng Z., Jingjing F., Zhipeng L., Mengtong Z. MEMS Gyroscopes Development and Application Overview on Intelligent Vehicles. In: *2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Hefei, China. 2020. P. 53–59. <https://doi.org/10.1109/CCDC49329.2020.9164093>
16. Zhanshe G., Fucheng C., Boyu L., et al. Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review. *Microsyst. Technol.* 2015;21(10):2053–2066. <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2645-x>

17. Коновалов С.Ф., Пономарев Ю.А., Майоров Д.В. Магнитная компенсация нулевого сигнала в гибридном двухкоординатном МЭМС-гироскопе R-R-R-типа. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*. 2013;4(93):122–131.
18. Каликанов А.В. Расчет чувствительного элемента микромеханического гироскопа RR-типа. *Молодой ученый*. 2020;1(291):28–33.
19. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом. *Микросистемная техника*. 1999;1:41–46.
20. Попова И.В., Лестев А.М., Семенов А.А., Иванов В.А., Ракитянский О.И. *Микромеханический гироскоп-акселерометр*: пат. 84542 РФ. Заявка № 20009105376/22; заявл. 16.02.2009; опубл. 10.07.2009.
21. Попова И.В., Лестев А.М., Семенов А.А., Иванов В.А., Ракитянский О.И., Бурцев В.А. Капсулированные микромеханические гироскопы и акселерометры для систем навигации и управления. *Гироскопия и навигация*. 2008;3(62):27–36.
22. Подураев Ю.В. Актуальные проблемы мехатроники. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2007;4:50–53.
23. Филимонов Н.Б. Предмет современной мехатроники и ее место в системе наук. *Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов*. 2017;1(7):151–159.
24. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Анализ и синтез интегрированных мехатронных модулей. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2005;10:3–8.
25. Bradley D. Mechatronics – More questions than answers. *Mechatronics*. 2010;20(8):827–841. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.07.011>
26. Bogolyubov V., Bakhtieva L. Astatic Gyrocompass Based on a Hybrid Micromechanical Gyroscope. In: *IEEE East-West Design and Test Symposium, (EWDTS) – Proceedings*. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9580982>
27. Евстифеев М.И. Основные этапы разработки отечественных микромеханических гироскопов. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2011;54(6):75–80.
28. Евстифеев М.И. Опыт разработки микромеханических гироскопов. В сб.: *Навигация и управление движением: материалы докладов X Юбилейной конференции молодых ученых*. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор»; 2008. С. 9–20.
29. Моисеев Н.В., Некрасов Я.А. Анализ систем управления вторичными колебаниями современных микромеханических гироскопов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2012;7:115–126.
30. Бекмачев А., Попова Н. Инерциальные МЭМС-датчики производства АО «ГИРООПТИКА». *Современная электроника*. 2018;5:4–6.
31. Евстафьев С.Д., Ракитянский О.И., Северов Л.А., Семенов А.А. Калибровка информационных характеристик микромеханического гироскопа. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2012;7:167–172.
32. Новиков В.Ю., Прилуцкий И.С. Перспективы развития микромеханических и наномеханических устройств. *Электронные средства и системы управления*. Материалы докладов IV Международной научно-практической конференции, 13–16 октября 2010 г. Томск: В-Спектр; 2011;2:109–113.
33. Теряев Е.Д., Филимонов Н.Б. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2010;1:2–14.
34. Кузнецов П.С. К вопросу технологии создания твердотельных микромеханических систем. *Естественные и технические науки*. 2024;3(190):136–139. <https://doi.org/10.25633/ETN.2024.03.09>
35. Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Федотов К.Д. Оптимизация управления параметрами метрологического обеспечения при производстве микромеханических гироскопов. *Вестник машиностроения*. 2015;5:40–45.
36. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Монография 6. Микроинженерия магнитных устройств. *Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении: Серия из 7 монографий*. Ивanteevka Моск. обл.: Изд-во НИИ предельных технологий; 2013. 205 с.
37. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Повышение равномерности нанесения тонких пленок в вакууме. *Технология машиностроения*. 2011;6:27–30.
38. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Устройства с бесконтактным магнитным взаимодействием для специального технологического оборудования. *Технология машиностроения*. 2011;2:47–51.
39. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Кузнецов П.С., Степанчиков С.В. Особенности применения устройств с бесконтактным магнитным взаимодействием в современном сверхвысоковакуумном контрольно-диагностическом и технологическом оборудовании. *Контроль. Диагностика*. 2011;2:44–48.
40. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Контрольно-навигационная система современного сверхвысоковакуумного аналитико-технологического комплекса. *Контроль. Диагностика*. 2012;5:71–74.
41. Ивашов Е.Н., Лучников А.П., Сигов А.С., Степанчиков С.В. *Проектирование элементов и устройств технологических систем электронной техники*. М.: Энергоатомиздат; 2008. 288 с.
42. Саленко Д.С. Особенности моделирования MEMS-гироскопа. *Автоматика и программная инженерия*. 2015;2(12):109–115.
43. Кузнецов П.С. Определение параметров при производстве МЭМС-гироскопов. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2014;1:456–460. <https://www.elibrary.ru/ukrxnl>
44. Кузнецов П.С. Компенсация нелинейности МЭМС-гироскопов с помощью математического моделирования. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2014;1:460–462. <https://www.elibrary.ru/ukrxnv>
45. Бойков И.В., Кривулин Н.П. Идентификация дискретных динамических систем с распределенными параметрами. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2014;2(30):34–48.

46. Крылов А.А., Корниук Д.В. Технологические подходы к устранению смещения нуля МЭМС гироскопов в составе гироскопического блока. *Труды МАИ*. 2018;103:18.
47. Крылов А.А., Кузнецов П.С. Устранение смещения нуля МЭМС-гироскопов при различной температурной динамике. *Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей*. 2019;2(29):34–39.
48. Крылов А.А. Исследование неустойчивости дрейфа нуля МЭМС-гироскопов и способов ее учета при калибровке. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020;1:64–69.
49. Бусурин В.И., Васецкий С.О., Казарьян А.В. Компенсационный микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости: пат. 2806242 РФ. Заявка № 2023123201А; заявл. 06.09.2023; опубл. 30.10.2023.
50. Xia D., Huang L., Zhao L. A New Design of an MOEMS Gyroscope Based on a WGM Microdisk Resonator. *Sensors*. 2019;19(12):2798. <https://doi.org/10.3390/s19122798>
51. Barbin E., Nesterenko T., Koleda A., Shesterikov E., Kulinich I., Kokolov A. An Optical Measuring Transducer for a Micro-Opto-Electro-Mechanical Micro-g Accelerometer Based on the Optical Tunneling Effect. *Micromachines*. 2023;14(4):802. <https://doi.org/10.3390/mi14040802>
52. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Штек С.Г., Жеглов М.А., Васецкий С.О., Чжи П.Л. Рамочный микрооптоэлектромеханический преобразователь угловой скорости с узлами оптического считывания на основе оптического туннельного эффекта. *Измерительная техника*. 2022;5:50–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-50-55>
53. Бусурин В.И., Васецкий С.О., Штек С.Г., Жеглов М.А. Микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости: пат. 2790042 RF. Заявка № 2022129761; заявл. 16.11.2022; опубл. 14.02.2023.
54. Barbin E., Nesterenko T., Koleda A., Shesterikov E., Kulinich I., Kokolov A., Perin A. The Design, Modeling and Experimental Investigation of a Micro-G Microoptoelectromechanical Accelerometer with an Optical Tunneling Measuring Transducer. *Sensors*. 2024;24(3):765. <https://doi.org/10.3390/s24030765>
55. Shtek S.G., Zheglov M.A., Belyakov V.V., Andreasyan O.G., Vasetskiy S.O., Kuznetsov P.S. Development of a Sensitive Element of a Micro-Opto-Electromechanical Accelerometer. In: *2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. <https://doi.org/10.23919/ICINS51816.2023.10168511>
56. Шмидт С.П., Иванов В.В. Перспективы создания и развития полностью оптического компьютера. *Инновационная наука*. 2015;8-2(8):83–85.
57. Молодяков С.А. Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов. *Информационно-управляющие системы*. 2008;6:2–8.
58. Степаненко С.А. Фотонный компьютер: структура и алгоритмы, оценка параметров. *Фотоника*. 2017;7(67):72–83. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.67.7.72.83>
59. Умарова У.Б. Оптические компьютеры и их достоинства. В сб.: *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции*: в 4-х т. Курск: ЗАО «Университетская книга»; 2014. С. 219–220.
60. Гордеев А., Войтович В., Святец Г. Перспективные фотонные и фононные отечественные технологии для терагерцовых микропроцессоров, ОЗУ и интерфейса со сверхнизким энергопотреблением. *Современная электроника*. 2022;2:65–72.
61. Rawat U., Anderson J.D., Weinstein D. Design and Applications of Integrated Transducers in Commercial CMOS Technology. *Front. Mech. Eng.* 2022;8:902421. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.902421>
62. Таишев С.Р., Крайнова К.Ю. Оптимизация условий поляризации в наноразмерных сегнетоэлектриках с целью дальнейшего применения в датчиках и МЭМС. *Молодой ученый*. 2016;1(105):224–227.
63. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. *Интегрированные сегнетоэлектрические устройства*. М.: Энергоатомиздат; 2011. 175 с.
64. Li S., Wang Y., Yang M., et al. Ferroelectric thin films: performance modulation and application. *Mater. Adv.* 2022;3(14):5735–5752. <https://doi.org/10.1039/D2MA00381C>
65. Tadigadapa S. Piezoelectric microelectromechanical systems – challenges and opportunities. *Procedia Eng.* 2010;5:468–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.148>
66. Мухортов В.М., Головки Ю.И., Бирюков С.В., Масычев С.И., Павленко А.В., Стрюков Д.В., Зинченко С.П., Ковтун А.П., Толмачев Г.Н. Наноразмерные сегнетоэлектрические пленки – новая активная среда для микроэлектроники. *Наука Юга России*. 2022;18(4):33–43. <https://doi.org/10.7868/S25000640220404>
67. *Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд*; под ред. Рабе К.М., Ана Ч.Г., Трискона Ж.М.: пер. с англ. М.: Лаборатория знаний; 2020. 443 с. ISBN 978-5-00101-827-8
68. Воротилов К.А., Сигов А.С., Романов А.А., Машевич П.Р. Формирование сегнетоэлектрических наноструктур для нового поколения устройств микро- и наноэлектроники. *Наноматериалы и наноструктуры – XXI век*. 2010;1(1):45–53.

REFERENCES

1. Maltsev P.P., Telets V.A. Lecture 13. Microsystem technology. In: *Bazovye leksii po elektronike (Basic Lectures on Electronics)*: in 2 v. V. II. *Solid-State Electronics*. Moscow: Tekhnosfera; 2009. P. 499–575 (in Russ.).
2. Peshekhonov V.G. The Outlook for Gyroscopy. *Gyroscopy Navig.* 2020;11:193–197. <https://doi.org/10.1134/S2075108720030062>
3. Damianos D., Mouly J., Delbos P. *Status of the MEMS Industry 2021*. Market & Technology Report; 2021. 10 p.

4. Sinelnikov A.O., Tikhmenev N.V., Ushanov A.A., Medvedev V.M. State-of-the-Art and Development Trends of Inertial Navigation Systems Based on the Ring Laser Gyroscopes. *Fotonika = Photonics Russia*. 2024;8(6):450–466. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2024.18.6.450.466>
5. Robin L., Perlmutter M. Gyroscopes and IMUs for Defense Aerospace and Industrial. *Report by Yole Development*. 2012. 317 p.
6. Pyzhova E.M. Micromechanical gyroscopes in navigation systems. In: *Prikladnaya elektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy – 2019 (Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems – 2019). Proceedings*. Kazan: Individual Entrepreneur Sagieva A.R.; 2019. P. 669–671 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/agslgx>
7. Verner V.D., Ivanov A.A., Kolomenskaya N.G., Luchinin V.V., Maljtcev P.P., Popova I.V., Saurov A.N., Teletc V.A. The Produces of Microsystems Techniques – Fundamental Ideals and Terms. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika = Nano- and Microsystem Technique*. 2007;12:2–5 (in Russ.).
8. Kuznetsov P.S. Issues and prospects for the development of mechatronics and microsystem technology. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika = Nano- and Microsystem Technique*. 2024;26(4):159–169 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/nmst.25.159-169>
9. Raspopov V.Ya., Nikulin A.V., Likhoshurst V.V. Classification of designs of micromechanical gyros. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument. Eng.* 2005;48(8):5–8 (in Russ.).
10. Vavilov V.D., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. *Mikrosistemnye datchiki fizicheskikh velichin (Microsystem Sensors of Physical Quantities)*. Monograph in two parts. Moscow: TEKhNOSFERA; 2018. 550 p. (in Russ.).
11. Timoshenkov S.P., Mikheev A.V., Kamenskii A.M., Artemov E.I., Polushkin V.M., Petrova N.A., Boev L.R., Puzikov V.V. Inertial microelectromechanical systems (accelerometers and gyroscopes). *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2020;(S96-2): 471–474 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.3s.471.474>
12. Asar C., Shkel A. *MEMS Vibratory Gyroscopes. Structural Approaches to Improve Robustness*. Springer; 2009. 260 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09536-3>
13. Lukyanov D.P., Raspopov V.Ya., Filatov Yu.V. *Prikladnaya teoriya giroskopov (Applied Theory of Gyroscopes)*. St. Petersburg: Electropribor; 2015. P. 42–46 (in Russ.).
14. Shakhnovich I.V. MEMS-gyroscopes – unity of choice. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2007;1:76–85 (in Russ.).
15. Xinfeng Z., Jingjing F., Zhipeng L., Mengtong Z. MEMS Gyroscopes Development and Application Overview on Intelligent Vehicles. In: *2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. Hefei, China. 2020. P. 53–59. <https://doi.org/10.1109/CCDC49329.2020.9164093>
16. Zhanshe G., Fucheng C., Boyu L., et al. Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review. *Microsyst. Technol.* 2015;21(10):2053–2066. <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2645-x>
17. Konovalov S.F., Ponomarev Yu.A., Mayorov D.V. Magnetic compensation of the zero signal in a two-axis hybrid R-R-R type MEMS gyro. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2013;4(93):122–131 (in Russ.).
18. Kalikanov A.V. Calculation of the sensing element of an RR-type micromechanical gyroscope. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2020;1(291):28–33 (in Russ.).
19. Bocharov L.Yu., Maltsev P.P. Status and development prospects of microelectromechanical systems abroad. *Mikrosistemnaya tekhnika = Microsystem Technology*. 1999;1:41–46 (in Russ.).
20. Popova I.V., Lestev A.M., Semenov A.A., Ivanov V.A., Rakityanskii O.I. *Micromechanical Gyroscope-Accelerometer*: RF Pat. 84542. Publ. 10.07.2009 (in Russ.).
21. Popova I.V., Lestev A.M., Semenov A.A., Ivanov V.A., Rakityanskii O.I., Burtsev V.A. Encapsulated micromechanical gyroscopes and accelerometers for navigation and control systems. *Giroskopiya i navigatsiya = Gyroscopy and Navigation*. 2008;3(62):27–36 (in Russ.).
22. Poduraev Yu.V. Actual problems of mechatronics. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2007;4:50–53 (in Russ.).
23. Filimonov N.B. The subject of modern mechatronics and its place in the system of sciences. *Mnogoyadernye protsessory, parallel'noe programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotki signalov = Multicore Processors, Parallel Programming, FPGAs, Signal Processing Systems*. 2017;1(7):151–159 (in Russ.).
24. Egorov O.D., Poduraev Yu.V. Analysis and synthesis of integrated mechatronic modules. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2005;10:3–8 (in Russ.).
25. Bradley D. Mechatronics – More questions than answers. *Mechatronics*. 2010;20(8):827–841. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.07.011>
26. Bogolyubov V., Bakhtieva L. Astatic Gyrocompass Based on a Hybrid Micromechanical Gyroscope. In: *IEEE East-West Design and Test Symposium, (EWDTS) – Proceedings*. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9580982>
27. Evstifeev M.I. Principal stages of development of domestic micromechanical gyroscopes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = J. Instrument. Eng.* 2011;54(6):75–80 (in Russ.).
28. Evstifeev M.I. Experience in the development of micromechanical gyroscopes. In: *Navigation and Motion Control: Materials of the Reports of the 10th Anniversary Conference of Young Scientists*. St. Petersburg: Electropribor; 2008. P. 9–20 (in Russ.).
29. Moiseev N.V., Nekrasov Ya.A. Analysis of control systems of mems gyroscope channel. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2012;7:115–126 (in Russ.).

30. Bekmachev A., Popova N. Inertial MEMS sensors manufactured by JSC GYROOPTIKA. *Sovremennaya elektronika = Modern Electronics*. 2018;5:4–6 (in Russ.).
31. Evstafiev S.D., Rakityanskii O.I., Severov L.A., Semenov A.A. Calibration of information characteristics MMG LL type. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2012;7:167–172 (in Russ.).
32. Novikov V.Yu., Prilutskii I.S. Prospects for the development of micromechanical and nanomechanical devices. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya (Electronic Means and Control Systems)*. Materials of the Reports of the 4th International Scientific and Practical Conference. October 13–16, 2010. Tomsk: V-Spektr; 2011;2:109–113 (in Russ.).
33. Teryaev E.D., Filimonov N.B. Nanomechatronics: state, problems, prospects. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2010;1:2–14 (in Russ.).
34. Kuznetsov P.S. On the issue of technology for creating solid-state micromechanical systems. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Natural and Technical Sciences*. 2024;3(190):136–139 (in Russ.). <https://doi.org/10.25633/ETN.2024.03.09>
35. Ivashov E.N., Kuznetsov P.S., Fedotov K.D. Optimization of control of metrological support parameters in the production of micromechanical gyroscopes. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2015;5:40–45 (in Russ.).
36. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznetsov P.S., Stepanchikov S.V. Monograph 6. Microengineering of magnetic devices. In: *Mikro- i nanoinzheneriya v elektronnom mashinostroenii (Micro- and Nanoengineering in Electronic Engineering): A series of 7 monographs*. Ivanteevka: Research Institute of Extreme Technologies; 2013. 205 p. (in Russ.).
37. Vasin V.A., Ivashov E.N., Stepanchikov S.V. Increasing the uniformity of thin film deposition in vacuum. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2011;6:27–30 (in Russ.).
38. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznetsov P.S., Stepanchikov S.V. Devices with contactless magnetic interaction for special technological equipment. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2011;2:47–51 (in Russ.).
39. Vasin V.A., Ivashov E.N., Kuznetsov P.S., Stepanchikov S.V. The features of application of devices with contactless magnetic interaction in modern ultrahigh vacuum control and diagnostic and technological equipment. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2011;2:44–48 (in Russ.).
40. Vasin V.A., Ivashov E.N., Stepanchikov S.V. Control and navigation system of the modern ultrahigh vacuum analytical and processing complex. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2012;5:71–74 (in Russ.).
41. Ivashov E.N., Luchnikov A.P., Sigov A.S., Stepanchikov S.V. *Proektirovanie elementov i ustroystv tekhnologicheskikh sistem elektronnoi tekhniki (Design of Elements and Devices of Technological Systems of Electronic Equipment)*. Moscow: Energoatomizdat; 2008. 288 p. (in Russ.).
42. Salenko D.S. Features of MEMS gyroscope modeling. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya = Automatics & Software Engineering*. 2015;2(12):109–115 (in Russ.).
43. Kuznetsov P.S. Determination of parameters in the production of MEMS gyroscopes. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii = Innovations Based on Information and Communication Technologies*. 2014;1:457–460 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/ukrxnv>
44. Kuznetsov P.S. Compensation of the nonlinearity of MEMS gyroscopes using mathematical modeling. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii = Innovations Based on Information and Communication Technologies*. 2014;1:460–462 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/ukrxnv>
45. Boikov I.V., Krivulin N.P. Identification of discrete dynamical systems with distributed parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Fiziko-matematicheskie nauk = University Proceedings. Volga region. Physical and Mathematical Sciences*. 2014;2(30):34–48 (in Russ.).
46. Krylov A.A., Korniyuk D.V. Technological approaches to zero offset compensation in MEMS gyroscopes being a part of the inertial measurement unit. *Trudy MAI*. 2018;103:18 (in Russ.).
47. Krylov A.A., Kuznetsov P.S. MEMS gyroscope zero drift elimination at different temperature dynamics. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antei*. 2019;2(29):34–39 (in Russ.).
48. Krylov A.A. Research of MEMS gyroscopes zero drift instability and ways of its accounting at calibration. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2020;1:64–69 (in Russ.).
49. Busurin V.I., Vasetsky S.O., Kazaryan A.V. *Compensating Micro-optoelectromechanical Angular Velocity Sensor*: RF Pat. 2806242. Publ. 30.10.2023 (in Russ.).
50. Xia D., Huang L., Zhao L. A New Design of an MOEMS Gyroscope Based on a WGM Microdisk Resonator. *Sensors*. 2019;19(12):2798. <https://doi.org/10.3390/s19122798>
51. Barbin E., Nesterenko T., Koleda A., Shesterikov E., Kulinich I., Kokolov A. An Optical Measuring Transducer for a Micro-Opto-Electro-Mechanical Micro-g Accelerometer Based on the Optical Tunneling Effect. *Micromachines*. 2023;14(4):802. <https://doi.org/10.3390/mi14040802>
52. Busurin V.I., Kazaryan A.V., Shtek S.G., Zheglov M.A., Vasetskiy S.O., Ky P.L. Frame microoptoelectromechanical angular velocity transducer with optical readout units based on optical tunneling effect. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;5:50–55 (in Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-5-50-55>
53. Busurin V.I., Vasetskii S.O., Shtek S.G., Zheglov M.A. *Micro-optoelectromechanical Angular Velocity Sensor*: RF Pat. 2790042. Publ. 14.02.2023 (in Russ.).
54. Barbin E., Nesterenko T., Koleda A., Shesterikov E., Kulinich I., Kokolov A., Perin A. The Design, Modeling and Experimental Investigation of a Micro-G Microoptoelectromechanical Accelerometer with an Optical Tunneling Measuring Transducer. *Sensors*. 2024;24(3):765. <https://doi.org/10.3390/s24030765>

55. Shtek S.G., Zheglov M.A., Belyakov V.V., Andreasyan O.G., Vasetskiy S.O., Kuznetsov P.S. Development of a Sensitive Element of a Micro-Opto-Electromechanical Accelerometer. In: *2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. <https://doi.org/10.23919/ICINS51816.2023.10168511>
56. Schmidt S.P., Ivanov V.V. Prospects for the creation and development of a fully optical computer. *Innovatsionnaya nauka = Innovative Science*. 2015;8-2(8):83–85 (in Russ.).
57. Molodyakov S.A. Optoelectronic processors with CCD photodetectors. Pipeline signal processing. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control systems*. 2008;6:2–8 (in Russ.).
58. Stepanenko S.A. Photonic computer: Structure and algorithms. Estimations of parameters. *Fotonika = Photonics*. 2017;7(67):72–3 (in Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.67.7.72.83>
59. Umarova U.B. Optical computers and their advantages. In: *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii (Modern Instrumental Systems, Information Technologies and Innovations)*. Collection of Scientific Papers of the 11th International Scientific and Practical Conference: in 4 v. Kursk: Universitetskaya kniga; 2014. P. 219–220 (in Russ.).
60. Gordeev A., Voitovich V., Svyatets G. Promising photonic and phonon domestic technologies for terahertz microprocessors, RAM and interface with ultra-low power consumption. *Sovremennaya elektronika = Modern Electronics*. 2022;2:65–72 (in Russ.).
61. Rawat U., Anderson J.D., Weinstein D. Design and Applications of Integrated Transducers in Commercial CMOS Technology. *Front. Mech. Eng.* 2022;8:902421. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.902421>
62. Taishev S.R., Krainova K.Yu. Optimization of polarization conditions in nanoscale ferroelectrics for further application in sensors and MEMS. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*. 2016;1(105):224–227 (in Russ.).
63. Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustroystva (Integrated Ferroelectric Devices)*. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 175 p. (in Russ.).
64. Li S., Wang Y., Yang M., et al. Ferroelectric thin films: performance modulation and application. *Mater. Adv.* 2022;3(14): 5735–5752. <https://doi.org/10.1039/D2MA00381C>
65. Tadigadapa S. Piezoelectric microelectromechanical systems – challenges and opportunities. *Procedia Eng.* 2010;5:468–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.148>
66. Mukhortov V.M., Golovko Yu.I., Biryukov S.V., Masychev S.I., Pavlenko A.V., Stryukov D.V., Zinchenko S.P., Kovtun A.P., Tolmachev G.N. Nanoscale ferroelectric films – a new active medium for microelectronics. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South of Russia*. 2022;18(4):33–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S25000640220404>
67. Rabe K.M., Ahn C.H., Triscone J.M. (Eds.). *Fizika segnetoelektrikov: sovremenniy vzglyad (Physics of Ferroelectrics: A Modern Perspective)*: transl. from Engl. Moscow: Laboratoriya znaniy; 2020. 443 p. (in Russ.). ISBN 978-5-00101-827-8 [Rabe K.M., Ahn C.H., Triscone J.M. (Eds.). *Physics of Ferroelectrics. A Modern Perspective*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007. 402 p.]
68. Vorotilov K.A., Sigov A.S., Romanov A.A., Mashevich P.R. Nanomaterials and structures in electronics. *Nanomaterialy i nanostruktury – 21 vek = Nanomaterials and Nanostructures – 21st Century*. 2010;1(1):45–53 (in Russ.).

Об авторе

Кузнецов Павел Сергеевич, к.т.н., заместитель начальника экспериментального комплекса микроэлектроники и микромеханических систем, Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «ГосНИИП») (129226, Россия, Москва, пр-т Мира, д. 125). E-mail: ps_kuznetsov@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 6564-9540, <https://orcid.org/0000-0001-5459-7883>

About the Author

Pavel S. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Experimental Complex of Microelectronics and Micromechanical Systems, State Scientific Research Institute of Instrument Engineering (GosNIIP) (125, Mira pr., Moscow, 129226 Russia). E-mail: ps_kuznetsov@mail.ru. RSCI SPIN-code 6564-9540, <https://orcid.org/0000-0001-5459-7883>