

М. И. ЕВСТИФЕЕВ

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Представлены основные этапы теоретических и практических разработок отечественных микромеханических гироскопов. Описаны достижения российских компаний и университетов в создании нового поколения датчиков. Рассмотрены особенности проектирования с учетом специфики используемых материалов и технологий.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, кремний, технология.

Введение. Благодаря прогрессу в технологии изготовления микромеханических датчиков, наблюдаемому в течение последнего десятилетия, был разработан целый ряд микромеханических гироскопов (ММГ), обладающих малыми массогабаритными характеристиками, низкой стоимостью и повышенной прочностью и предназначенных для широкого класса приборов навигации и управления движением. Лидерство в разработке ММГ принадлежит Лаборатории им. Дрейпера (США), занимающейся проблематикой создания микромеханических датчиков с 1990 г. В настоящее время серийное производство ММГ класса точности 0,05...0,1 °/с освоено компаниями “Analog Devices” (США), “SensoNor” (Норвегия), “Bosch” (Германия), “Kionix” (США), “InvenSense” (США) и др. Разработки отечественных ММГ начаты с отставанием более чем на десятилетие, но постепенно выходят на мировой уровень. Несмотря на большое количество работ по этой тематике возможности использования зарубежного опыта проектирования оказались весьма ограниченными вследствие фрагментарности и рекламного характера основного числа публикаций. Причинами отставания для большинства отечественных разработок были низкий уровень технологии изготовления кремниевых микроустройств и отсутствие опыта проектирования, который существенным образом зависит от возможностей производства. Значительное ограничение состояло в недоступности технологий изготовления, являющихся “know-how” зарубежных компаний.

Этап теоретических исследований. После 1995 г. в отечественной литературе были сформулированы основные направления использования ММГ в качестве навигационных датчиков [1, 2] и появились первые публикации, касающиеся теоретических вопросов создания приборов. Широкий спектр исследований, проводимых с конца 90-х гг. по настоящее время, направлен на решение следующих основных проблем: принципы построения и выбора конструктивных схем гироскопа [3—8]; составление математических моделей и структурных схем [9—11]; исследование динамических характеристик и выбор методов их идентификации, включая метрологические аспекты испытаний [12—15]; методы подавления квадратурных и других видов помех [16, 17]; методы и перспективы измерения сверхмалых емкостей [18]; исследование нелинейностей и методов их подавления [19, 20]; основы построения и реализации технологических процессов изготовления [21]; перспективы разработки инерциальных блоков на основе ММГ [22—27].

В процессе теоретических исследований рассматривались различные частные вопросы, такие как влияние на характеристики ММГ анизотропии монокристаллического кремния и его кристаллографических направлений [28, 29], влияние вибраций при неравножесткости упругого подвеса [30], воздействие температурных и технологических факторов [31, 32] и пр.

Большой вклад в теорию и создание ММГ внесли Л. П. Несенюк, Л. А. Северов, А. М. Лестев, Д. П. Лукьянов, С. Г. Кучерков, В. М. Ачильдиев, А. П. Мезенцев. Теории ММГ и обобщению опыта их разработки посвящены монографии В. Э. Джашидова и В. М. Панкратова [33], А. С. Неаполитанского и Б. В. Хромова [34]. Особо следует отметить книгу

В. Я. Распопова [35], в которой представлено систематизированное изложение основ проектирования микромеханических приборов и принципов выбора их динамических характеристик.

Теоретические работы в этом направлении ведутся такими организациями, как ОАО „Раменское ПКБ“ (Раменское, Московская обл.), НИИ ПМ им. акад. В. И. Кузнецова (Москва), ЗАО „Гирооптика“ (Санкт-Петербург), ЦНИИ „Электроприбор“ (Санкт-Петербург), а также в университетах и институтах Москвы, Санкт-Петербурга, Тулы, Саратова и других городов России.

Благодаря усилиям отечественных ученых отставание в разработке ММГ было существенно сокращено и ключевым моментом стал вопрос реализации достигнутых теоретических достижений.

Этап реализации технических решений. В середине 90-х гг. ни одно из отечественных предприятий не имело всех необходимых технологических операций (особенно глубокого травления кремния на величину более 15 мкм) и полного цикла изготовления. Для поиска технологических решений ряд организаций обратились к помощи зарубежных компаний, другие пошли по пути развития собственных процессов, закупая необходимое оборудование, третьи использовали научно-технологический задел отечественных предприятий и учебных заведений, например, таких как заводы „Микрон“ и „Ангстрем“ (оба — Зеленоград), лаборатории микроэлектроники при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПбГПУ) и Московском государственном институте электронной техники (МИЭТ).

В зависимости от способа изготовления ММГ выполняются из неметаллических материалов — кварца, кремния, пьезокерамики, арсенида галлия и др. Методы технологии изготовления ММГ можно разделить на три основные группы: нанесение слоев различных материалов (осаждение, напыление, гальванические покрытия), удаление слоев материала (изотропное и анизотропное травление), модифицирование свойств материалов (засветка фоторезиста, борирование, оксидирование и т.д.). Большинство разработчиков сосредоточились на освоении более дешевой кремниевой технологии.

К особенностям микроэлектронной технологии изготовления ММГ следует отнести:

- планарность конструкций, при которой толщина подвижных конструктивных элементов значительно (в десятки раз) меньше длины и ширины;
- одинаковые допуски на все размеры в основной плоскости элемента, определяемые допуском минимального размера;
- невысокую относительную точность обработки, достигаемую микроэлектронной технологией (размеры упругих элементов планарных подвесов малы и составляют несколько десятков микрометров), и, таким образом, несмотря на погрешности формообразования менее 0,5 мкм, достижимая относительная точность (погрешность формообразования/размеры) составляет 10^{-2} — 10^{-3} ; для традиционного приборостроения может быть достигнута относительная точность 10^{-5} — 10^{-6} ;
- высокую автоматизацию производства, что позволяет производить крупносерийные изделия с низкой стоимостью;
- широкие возможности миниатюризации благодаря интеграции механических и электронных компонентов.

Размеры упругих элементов подвеса, изготавливаемых подобными технологическими методами, составляют десятки микрометров, а зазоры в подвижных структурах измеряются единицами микрометров. Например, в ЦНИИ „Электроприбор“ при заключении контракта с фирмой “TRONIC’S Microsystems” (Гренобль, Франция) на изготовление ММГ с электростатическими двигателями и емкостным датчиком были сформулированы следующие требования: объединение механической и электронной частей в объеме менее 1 см³; размеры упругих элементов примерно 10 мкм; толщина осциллятора 20—60 мкм; соотношение размеров при травлении (вертикальность стенок) 1:100; зазоры в конструкции 2 мкм; точность изготовле-

ния 0,1—0,2 мкм; шероховатость поверхности менее 0,02 мкм; чувствительность к перемещениям 10^{-4} мкм ($\sim 1 \text{ \AA}$); измерение емкости 1—2 пФ с точностью 0,1 фФ; добротность осциллятора более 10^4 ; вакуумирование внутренней полости 10^{-3} мм рт. ст.

Комплексное выполнение технологических требований изготовления ММГ, даже с использованием зарубежных технологий и оборудования, представляет собой довольно сложную проблему, на решение которой у различных отечественных организаций ушло от 5 до 10 лет упорной работы. При этом было апробировано большое количество технических решений, касающихся выбора методов травления [36], использования электромагнитных датчиков взамен электростатических [37], реализации вакуумированной или газонаполненной конструкции [37, 38], выбора технологии „кремний на стекле“ или „кремний на изоляторе“, разработки стендового и метрологического оборудования для испытаний полученных ММГ и других вопросов. При разработке ММГ в ЦНИИ „Электроприбор“ наиболее сложными проблемами было создание специализированной интегральной микросхемы (ASIC) для обработки выходного сигнала, а также отработка технологического процесса вакуумирования осциллятора на уровне кремниевой пластины, т.е. создание герметичного кристалла чувствительного элемента.

Этот период характеризуется большим количеством отечественных патентов, посвященных конкретным техническим особенностям реализации ММГ в производстве. При этом число публикаций, описывающих принятые и реализованные решения, заметно уменьшилось, что свидетельствовало либо о прекращении исследований в этой области, либо о готовности полученной продукции к выходу на рынок.

Этап коммерциализации продукции. Начиная с 2006 г. и по настоящее время отечественные компании, занимающиеся разработкой ММГ, вышли на этап создания коммерчески привлекательной продукции гражданского и оборонного назначения. Можно констатировать, что разработка первого поколения ММГ завершена и решаются задачи создания интегрированных систем навигации и управления движением.

Наибольшие усилия на этом этапе будут направлены на снижение стоимости продукции, повышение точности, уменьшение массогабаритных характеристик, расширение функциональных возможностей и условий эксплуатации. Стоимость ММГ, как и других компонентов микроэлектроники, обратно пропорциональна объему выпуска продукции. Для увеличения объема следует проводить работы по поиску потенциальных заказчиков и созданию отечественных ММГ, конкурентоспособных по своим характеристикам с зарубежными образцами. Следует отметить, что задача эта очень непростая, учитывая, что компания “InvenSense” (США) выпустила двух- и трехосевые ММГ с размерами $4 \times 4 \times 0,9$ мм для бытовой электроники и планирует довести стоимость до 1 долл. за ось.

Сведения о некоторых модификациях отечественных ММГ, разработанных российскими компаниями, приведены в таблице.

Производитель	Модификация	Габариты, мм	Диапазон измерения угловой скорости, °/с	Характеристика точности
ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“» (Санкт-Петербург)	ММГ-2	50×50×18	1000	Плотность шума 0,3 °/с/√Гц
„Айсенс“ (iSense LLC) (Москва)	АИСТ-100	8×32 (плата электроники) Ø18,4×20,5 (по корпусу)	300	Стабильность нуля 20 °/ч
ОАО „Раменское ПКБ“ (Раменское)	ММГ	35×35×30	200	Случайная составляющая дрейфа 0,1 °/с
ОАО «НИИ „Элпа“» (Зеленоград)	МПГ-2	12,5×12,4×8,4	120	Порог чувствительности 0,02 °/с

Участие выпускников кафедры информационно-навигационных систем (ИНС). Многие выпускники кафедры ИНС Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, которая является базовой при ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», в настоящее время работают на этом предприятии. Ряд выпускников занимаются разработкой ММГ и созданием систем на его основе: А. А. Унтилов (выпуск 2001 г.) защитил кандидатскую диссертацию по теме „Исследование и разработка упругого подвеса чувствительного элемента ММГ“ под руководством автора статьи; аспиранты Д. В. Розенцвейн и С. В. Багаева (оба — выпуск 2006 г.) подготовили к защите диссертации, касающиеся вопросов разработки ММГ с улучшенными характеристиками; аспирант А. П. Степанов (выпуск 2005 г.) под руководством профессора кафедры Г. И. Емельянцева работает над созданием и исследованием интегрированных систем на ММГ в отделе, руководимом Д. В. Волынским (выпуск 2002 г.). Это показывает значимый теоретический и практический вклад выпускников кафедры ИНС в разработку отечественных ММГ.

Исследования по рассматриваемой тематике выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 10-08-00153-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пешехонов В. Г.* Микромеханические гироскопические приборы и задачи навигации // Гироскопия и навигация. 1996. № 3. С. 129.
2. *Пешехонов В. Г.* Проблемы и перспективы современной гироскопии // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 1—2. С. 48—56.
3. *Северов Л. А.* и др. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41, № 1—2. С. 57—73.
4. *Будкин В. Л.* и др. Разработка кремниевых датчиков первичной информации для систем навигации и управления // Гироскопия и навигация. 1998. № 3. С. 94—101.
5. *Ачильдиев В. М., Дрофа В. Н., Рублев В. М.* Микромеханический вибрационный гироскоп-акселерометр // Микросистемная техника. 2001. № 5. С. 8—10.
6. *Кучерков С. Г., Шадрин Ю. В.* К вопросу о выборе конструктивных параметров микромеханического кольцевого гироскопа вибрационного типа // Навигация и управление движением: Материалы III конф. молодых ученых. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. С. 94—101.
7. *Лукьянов Д. П.* и др. Микроакселерометры и микрогироскопы на ПАВ // Гироскопия и навигация. 2002. № 4. С. 41.
8. *Евстифеев М. И.* Проблемы проектирования и опыт разработки микромеханических гироскопов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 70—76.
9. *Евстифеев М. И.* Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гироскопия и навигация. 2007. № 2. С. 63—76.
10. *Лестев А. М., Попова И. В.* Современное состояние теории и практических разработок микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 1998. № 3. С. 81—94.
11. *Харламов С. А.* О движениях микромеханического вибрационного гироскопа // Материалы IX Междунар. конф. по интегрированным системам. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2002. С. 210—212.
12. *Лестев А. М.* и др. Разработка и исследование микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 1999. № 2. С. 3—10.
13. *Северов Л. А.* и др. Информационные характеристики микромеханического вибрационного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2003. № 1. С. 76—82.
14. *Кучерков С. Г.* и др. Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2003. № 2. С. 98—104.

15. *Распопов В. Я.* Зависимость динамических характеристик микромеханических гироскопов от стабильности режимов настройки // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 8. С. 9—17.
16. *Беляева Т. А.* и др. Подавление квадратурной помехи в микромеханическом гироскопе RR-типа с помощью электродов, расположенных над зубцовой зоной // Гироскопия и навигация. 2008. № 1. С. 82—90.
17. *Андреева Т. А., Некрасов Я. А.* Система подавления квадратурной помехи в выходном сигнале микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением: Материалы VII конф. молодых ученых. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2006. С. 175—181.
18. *Некрасов Я. А.* Методы повышения точности съема информации в микромеханических гироскопах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2007 [Электронный ресурс]: <<http://www.elektropribor.spb.ru/rufrset.html>>.
19. *Лестев М. А.* Нелинейный параметрический резонанс в динамике микромеханического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 2. С. 36—42.
20. *Карелин А. П., Лестев М. А.* Влияние электростатической составляющей жесткости на динамику и погрешности микромеханического гироскопа // Аэрокосмические приборные технологии: Материалы III междунар. симпозиума. СПб: ГУАП. 2004. С. 285—287.
21. *Тимошенко С. П.* и др. Влияние пор и нанослоев на изгибную жесткость подвеса кремниевого чувствительного элемента МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 7. С. 11—16.
22. *Доронин В. П.* и др. Основные проблемы создания миниатюрного инерциального измерительного прибора на базе микромеханических чувствительных элементов // Гироскопия и навигация. 1996. № 4. С. 55.
23. *Мезенцев А. П.* и др. Основные проблемы создания инерциальных блоков на базе микромеханических гироскопов и акселерометров // Гироскопия и навигация. 1997. № 1. С. 7—15.
24. *Ачильдиев В. М.* и др. Система измерений геометрических параметров и качества покрытия дорожного полотна на основе инерциального блока БИ-210 // Микросистемная техника. 2001. № 8. С. 19—24.
25. *Мезенцев А. П., Фролов Е. Н., Клишкин М. Ю., Мезенцев О. А.* Среднеточная ИНС „АИСТ-320“ с кориолисовым вибрационным гироскопом „АИСТ-100“. Идеология и результаты разработки, производства и испытаний // Материалы XIV Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007. С. 9—21.
26. *Попова И. В.* и др. Микромеханические датчики и системы. Практические результаты и перспективы развития // Гироскопия и навигация. 2006. № 1. С. 29—34.
27. *Пешехонов В. Г.* и др. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ „Электроприбор“ // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 2. С. 29—31.
28. *Унтилов А. А.* Влияние анизотропии монокристаллического кремния на характеристики микромеханического гироскопа // Навигация и управление движением: Материалы VI конф. молодых ученых. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2005. С. 154—161.
29. *Распопов В. Я., Матвеев В. В.* Зависимость характеристик микромеханического гироскопа от ориентации упругих элементов на пластине монокристаллического кремния // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 6. С. 61—66.
30. *Евстифеев М. И.* Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. 2002. № 2. С. 19—25.
31. *Джашитов В. Э.* и др. Расчет температурных и технологических погрешностей микромеханических гироскопов // Микросистемная техника. 2001. № 3. С. 2—10.
32. *Евстифеев М. И., Унтилов А. А.* Требования к точности изготовления упругого подвеса микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2003. № 2. С. 24—31.
33. *Джашитов В. Э., Панкратов В. М.* Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем / Под ред. В. Г. Пешехонова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. 150 с.
34. *Неаполитанский А. С., Хромов Б. В.* Микромеханические вибрационные гироскопы. М.: Когито-центр, 2002. 122 с.
35. *Распопов В. Я.* Микромеханические приборы: Учеб. пособие. Тула: Гриф и К, 2004. 476 с.

36. Козин С. А. Технологии МЭМС в разработках интегральных датчиков механических параметров // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 10—14.
37. Коновалов С. Ф. и др. Двухкоординатный микромеханический ДУС с магнитоэлектрическими датчиками обратной связи по каналам возбуждения и измерения // Материалы XVII Санкт-Петербург. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2010. С. 17—25.
38. Кучерков С. Г. Определение необходимой степени вакуумирования рабочей полости осциллятора микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2002. № 1. С. 52—56.

Сведения об авторе

Михаил Илларионович Евстифеев — д-р техн. наук, профессор; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, начальник отдела;
E-mail: evstifeevm@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-навигационных
систем СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
18.01.11 г.