

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 11 августа № 14.575.21.0069 с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 2 в период с 1 января 2015 года по 30 июня 2015 года выполнялись следующие работы:

1. Разработана функциональная схема инерциальной измерительной системы.
2. Проведены теоретические расчеты и моделирование интегрированных МЭМС, объединяющих функции сенсорных, управляющих и исполнительных элементов.
3. Разработана Программа и методики исследовательских испытаний экспериментального образца инерциальной измерительной системы.
4. Разработаны требования к допускаемым технологическим дефектам изготовления МЭМС, обеспечивающие заданный уровень точности МЭМС.
5. Созданы математические модели интегрированных МЭМС с использованием современных методов моделирования и систем автоматизированного проектирования.
6. Исследованы и отработаны процессы глубокого селективного травления кремния, направленные на улучшение параметров разрабатываемых интегрированных МЭМС.

Получены следующие результаты:

1. На основе информации, полученной на первом этапе ПНИ, предлагается следующая функциональная схема: блок инерциальных датчиков, блок оцифровки аналоговых сигналов, блок вычислителя, блок начальной выставки и блок питания. Для обеспечения связи между блоками ИИС используются как аналоговые линии, так и шины цифровых интерфейсов (SPI, UART, SPORT). Связь с головным вычислителем (потребителем данных) обеспечивается блоком вычислителя ИИС.
2. Проведенные теоретические расчеты позволяют вычислить жесткость X-образного подвеса микроакселерометра, позволяющего получить заданный диапазон 5g, зависимость ёмкостей от угла отклонения пластины или от её перемещения, зависимость выходного напряжения датчика от ёмкости. Также приведены две схемы преобразователя «ёмкость-напряжение». Также проведена оценка зависимости ошибок определения навигационных параметров от точности начальной выставки интегрированной инерциальной измерительной системы, оценка зависимости ошибок определения навигационных параметров от точности инерциальных датчиков и оценка зависимости ошибок определения координат от ошибок сдвигов нулей акселерометров.
3. На основе проведенных ранее работ, а также основываясь на Методических рекомендациях Минобрнауки России и следующих нормативных документах: ГОСТ 12.3.019 ССБТ. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности, ГОСТ 21130 Изделия электрические. Зажимы заземляющие. Знаки защитного заземления. Конструкция и размеры., ОСТ 88 211 Приборы и средства автоматизации для научных исследований. Приемка, маркировка, упаковка, транспортирование, хранение и гарантии изготовителя, ГОСТ 21657 Электрическая изоляция изделий ГСП. Технические требования и методики испытаний. ГОСТ 27209 Оборудование электротермическое. Методы испытаний, «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей». М., Госэнергонадзор, 1994, «Правила технической эксплуатации

электроустановок потребителей», М., Энергосервис, 2003 г., «Измерения в электрических цепях», УМИТЦ Мосгорэнергонадзора, М., 2001 г была разработана Программа и методики проведения исследовательских испытаний опытных образцов инерциальной измерительной системы. Программа и методики исследовательских испытаний приведены в Приложении А.

4. В соответствии с выполненным на первом этапе ПНИ анализом влияния различных технологических дефектов на точность изготовления МЭМС различных видов, а также в результате проведенных экспериментальных исследований были разработаны следующие требования к допускаемым технологическим дефектам изготовления МЭМС, обеспечивающих заданный уровень точности МЭМС.

Большое влияние на качество изготавливаемых МЭМС оказывают параметры исходных кремниевых пластин. По сравнению с пластинами, используемыми для изготовления интегральных схем, пластины для изготовления МЭМС должны отвечать следующим требованиям. Толщина пластины должна быть не менее 300 мкм. Выбор данной толщины обусловлен компромиссом двух взаимно противоречивых требований. С одной стороны пластины должны быть как можно тоньше для сокращения времени травления, с другой стороны толщина пластины должна обеспечить возможность их обработки на технологическом оборудовании, обеспечивая их целостность. Кроме того, кремниевые пластины для МЭМС отличаются повышенными требованиями по разориентации поверхности и базового среза относительно кристаллографических плоскостей. Разориентация поверхности относительно кристаллографической плоскости приводит к растраву элементов МЭМС. Чем больше разориентация, тем больше растрав. Разориентация рисунка топологии относительно направлений $\langle 110 \rangle$ не только приводит к растраву элементов МЭМС, а также к искажению конфигурации МЭМС. В результате расчетов и проведенных экспериментальных исследований были определены критерии по разориентации поверхности относительно кристаллографической плоскости $(100) \pm 10$ угл. мин и базового среза относительно кристаллографической плоскости $(110) \pm 10$ угл. мин. Такие параметры пластины обеспечивают точность изготовления элементов МЭМС ± 1 мкм, которая является типовой для большинства конструкций МЭМС и минимальное искажение конфигурации МЭМС.

Также приведены требования по режимам травления, по формированию многопрофильных конструкций МЭМС, и требования по растраву внешних углов

5. В ходе выполнения работ ЗАО «ИТПП» были разработаны математические модели интегрированных МЭМС с использованием современных методов моделирования и систем автоматизированного проектирования. Модель твердого тела описывает динамику его перемещения во вращающейся СК с началом в центре Земли. Тело движется под действием сил и моментов, а задаваемые начальные условия, определяющие его скорости движения и вращения в нулевой момент времени, а также координаты точки старта, позволяют моделировать работу ИИС.

Динамическая модель инерциального измерительного блока позволяет задавать полосу пропускания акселерометров и гироскопов, их уровни шумов, модель ошибок, включающую для акселерометров погрешности масштабных коэффициентов, сдвиги нулей, перекрестные связи между осями датчиков, а для гироскопов, помимо вышеперечисленных параметров дополнительно задавать величины сдвигов нулей, зависящих от ускорений. Также задается место установки инерциального измерительного блока, отличное от центра масс носителя.

6. Также в ходе работ по этапу №2 были исследованы и отработаны процессы

глубокого селективного травления кремния, направленные на улучшение параметров разрабатываемых интегрированных МЭМС. На основании проведенных работ составлена маршрутная карта процессов глубокого селективного травления кремния, представленная в отчете о ПНИ.

В ходе выполнения 2 этапа проекта все поставленные задачи решены в полном объеме. Полученные результаты соответствуют требованиям технического задания. Продолжение работ по проекту представляется целесообразным и актуальным. С учетом полученных результатов перспективы успешного выполнения проекта являются высокими.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.