



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»
(ГУАП)

ул. Большая Морская, д. 67, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-65-10, Факс (812) 494-7057, E-mail: common @ aanet.ru
ОГРН 1027810232680, ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ _____

На № _____ от _____

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Пауткина Валерия Евгеньевича
"Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных
чувствительных элементов микромеханических акселерометров",
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.14 – Технология приборостроения

Актуальность темы

Объектом исследования в диссертации В.Е. Пауткина является запатентованный микроэлектромеханический акселерометр с пьезорезистивной схемой, выполненный по разработанной автором технологии, представляющей собой сочетание объемной и пленочной технологий с применением композиции кремний на изоляторе (SCS-SiO₂ polySi) в качестве конструкционного материала.

Поскольку исследуемый акселерометр относится к классу МЭМС с пьезорезистивными измерительными преобразователями, а разработка и создание новых МЭМС входит составляющей в раздел «Технологии механотроники и создания микросистемной техники» перечня критических технологий РФ, то актуальность темы не вызывает сомнений.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Для обоснования результатов исследований автором использованы положения физики твердого тела, численное и аналитическое описание физических свойств кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов, статистические методы обработки экспериментальных данных, положенные в основу разработки модели управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов на отдельных этапах технологического процесса, математическое моделирование деформаций в кремниевом чувствительном элементе, выполненное с применением пакета программ имитационного моделирования. При разработке технологии формирования чувствительных элементов, включающей создание измерительной схемы, использован ряд положений физической химии, кристаллофизики. Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждена применением аппарата теории измерений и планирования эксперимента.

Новизна исследований и полученных результатов

В результате проведенных исследований автором получены следующие результаты:

- разработана новая технология синтеза пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C . Это подтверждено результатами исследований чувствительных элементов, показавших снижение уровня начального выходного сигнала при воздействии повышенной температуры с ± 15 мВ до ± 4 мВ, а также уменьшение температурной погрешности измерений с $\pm 1,5$ % до $\pm 0,5$ %.
- разработана аналитическая модель управления электрическими параметрами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов на отдельных этапах технологического процесса за счет научно обоснованного выбора технологических режимов.

Новизна исследований заключается в том, что впервые определены количественные зависимости между технологическими режимами формирования и выходными параметрами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров. Принципиально новой является разработанная технология их изготовления, основанная на предложенной в диссертации технологической модели, включающая быстрый термический отжиг поликристаллического кремния.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Научная значимость диссертации заключается:

- в теоретическом и экспериментальном подтверждении возможности создания нового типа кремниевых микромеханических акселерометров для изделий ракетно-космической техники, а также промышленного и бытового применения;
- в совершенствовании существующих и разработке новых технологий изготовления кремниевых чувствительных элементов микромеханических акселерометров, обеспечивающих работоспособность при воздействии повышенных температур окружающей среды;
- в разработке аналитической модели управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров на различных этапах технологического процесса.

Практическая значимость диссертации состоит:

- в разработке топологии кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, работоспособных при температурах более 100°C , обеспечивающей увеличение чувствительности на 10% по сравнению с существующими аналогами, что подтверждено соответствующими документами;
- во внедрении результатов диссертационной работы на предприятии ОАО "НИИФИ" (г. Пенза) при производстве кремниевых пьезорезистивных

чувствительных элементов микромеханических акселерометров, что подтверждается соответствующими актами.

- в использовании результатов диссертационной работы при проектировании приборов, разрабатываемых в рамках НИОКР по программе Роскосмоса.

Внутреннее единство структуры работы

Диссертационная работа отличается внутренним единством, последовательностью изложения теоретических и экспериментальных исследований. Она разделена на четыре основные главы, в которых последовательно дается обоснование конструкторских и технологических решений, разработке на их основе аналитической и технологической моделей, технология изготовления чувствительного элемента и его исследования.

Заключение по диссертации

Предложенная диссертационная работа является законченным научным трудом, соответствующим требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней к кандидатским диссертациям и соответствует профилю специальности. Содержание автореферата отражает основные идеи и выводы диссертации.

Диссертация написана технически грамотным языком. Используемые термины соответствуют нормативно-технической документации.

В диссертационной работе автором проведен анализ методов и средств создания кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, разработаны аналитическая модель управления электрическими свойствами кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов, технологическая модель кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, разработана оригинальная технология изготовления чувствительных элементов, технология формирования пьезорезисторов измерительной мостовой схемы, проведены исследования изготовленных чувствительных элементов. Проведенные исследования показали, что

изготовленные по предложенным конструктивно-технологическим решениям чувствительные элементы имеют пониженный дрейф начального выходного сигнала при повышенной температуре по сравнению с аналогами (± 4 мВ у изготовленных элементов в сравнении с ± 15 мВ для аналогов), а также меньшую температурную погрешность ($\pm 0,5\%$ в сравнении с $\pm 1,5\%$ для аналогов).

Полученные при выполнении работы результаты соответствуют положениям, выносимым на защиту, а также целям и задачам диссертационной работы.

Содержание автореферата соответствует содержанию основных глав работы.

Содержание основных опубликованных работ соответствует содержанию диссертации. По материалам диссертационной работы Пауткиным В.Е. опубликовано 20 статей, среди которых 4 – в ведущих рецензируемых журналах из перечня ВАК. Новизна технических решений подтверждена 4 патентами РФ на изобретения и 4 свидетельствами о государственной регистрации топологии интегральных микросхем.

Диссертационная работа Пауткина В.Е. соответствует паспорту специальности 05.11.14 – Технология приборостроения:

п. 1 – Разработка научных основ технологии приборостроения при создании нового поколения чувствительных элементов микромеханических акселерометров. Разработанные аналитическая и технологическая модели безусловно имеют научную значимость и могут быть положены в основу при разработке соответствующих моделей других классов микромеханических датчиков;

п.3 – Разработка и исследование методов и средств повышения надежности микромеханических акселерометров.

п.5 – Разработка и исследование методов организации технологической подготовки приборостроительного производства. Разработанная технология несомненно имеет отличия от известных аналогов, что влечет за собой

изменение последовательности проводимых операций и используемой технологической оснастки.

Автор диссертационной работы Пауткин В.Е. грамотно сформулировал выводы, результаты теоретических и практических исследований подтверждаются графиками и диаграммами, в приложении приведены расчеты, используемые автором в работе, а также технологический маршрут изготовления чувствительного элемента, что не загромождает основную часть диссертации, а позволяет обратиться специалистам к приложениям по интересующим их вопросам.

Необходимо отметить, что за время выполнения диссертационной работы автором получено:

- свидетельство на топологию разработанного чувствительного элемента (Пауткин В.Е. Термокомпенсационный измерительный преобразователь-39 / Пауткин В.Е., Шепталина С.В., Николаев А.А. / Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы №2012630032. Заявка №2011630105 от 28.12.2011. Оpubл. 20.01.2012);
- патент на разработанный чувствительный элемент (Патент РФ № 2504866, Российская Федерация, МПК H01L29/84. Интегральный тензопреобразователь ускорения / Пауткин В.Е. Заявка 2012122850/28 от 01.06.2012, опубл. 20.01.2014, бюл.№ 2.).

Автор диссертационной работы Пауткин В.Е. является грамотным специалистом, имеет большой опыт в разработке технологий чувствительных элементов кремниевых микромеханических приборов, что подтверждается его работой в ОАО «НИИФИ» и наличием патентов и зарегистрированных топологий интегральных микросхем.

К недостаткам работы можно отнести:

- отсутствие исследований методических составляющих суммарной погрешности пьезорезистивного акселерометра, в частности, возникающих из-за неучтенности анизотропии механических свойств монокристаллического кремния;

- отсутствие обоснованного выбора пьезорезистивной измерительной схемы для решения поставленных в диссертации задач и объективного сравнения ее технических характеристик с емкостными или резонансными измерительными преобразователями, которые в ряде случаев обеспечивают инвариантность этих МЭМС к изменению температуры окружающей среды;
- не уделено должного внимания обоснованию выбора применяемого метода литографии, от которого зависит технологическая составляющая суммарной погрешности акселерометра;
- неполное описание технологической операции сборки чувствительного элемента;
- отсутствие описания влияния повышенной температуры на схему обработки сигнала с чувствительного элемента;
- нет анализа влияния технологической установки и фиксации чувствительного элемента на метрологические характеристики микромеханического акселерометра.

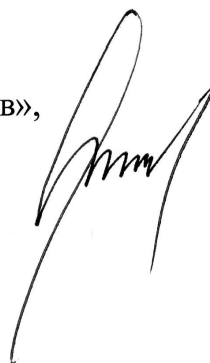
Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают научной ценности оппонированной диссертации.

Считаю, что диссертационная работа "Разработка технологии формирования кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров" автора Пауткина В.Е. является законченной научной квалификационной работой, в которой решены задачи разработки научно-обоснованных технических решений и технологии создания кремниевых пьезорезистивных чувствительных элементов микромеханических акселерометров, удовлетворяющей требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, результаты которой имеют научную и практическую значимость, вносят вклад в улучшение характеристик кремниевых микромеханических приборов, обеспечивая повышение температурного диапазона измерений микромеханических акселерометров, необходимых при отладке изделий ракетно-космической

техники и общепромышленного применения, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв составил

Доцент кафедры «Конструирования
и технологии электронных и лазерных средств»,
кандидат технических наук, доцент



О.М. Филонов

190000, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, ГУАП
Телефон: +7 (812) 494-70-14
E-mail: omfomf2@gmail.com