

В. А. Шокоров

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ
И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

V. A. Shokorov

**DEVELOPING AND APPLICATION OF PRESSURE
AND TEMPERATURE SENSORS BASED ON
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS
FOR PART SPACE-AND-ROCKET ENGINEERING**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Предметом исследования являются полупроводниковые датчики давления и температуры. Целью работы является разработка распределенных датчиков давления и температуры на основе микроэлектромеханических систем для изделий ракетно-космической техники, работающих при повышенных значениях внешних воздействующих факторов. **Материалы и методы.** Обоснована целесообразность применения определенных конструкционно-технологических решений. **Результаты.** Приведена разработанная конструкция датчика. Проведены патентные исследования, подтверждающие новизну применения разработанных конструктивно-технологических решений. **Выводы.** Предложенная авторами конструкция полупроводникового датчика давления и температуры позволит увеличить надежность и полезную нагрузку космического аппарата; технические и метрологические характеристики датчика не уступают отечественным и зарубежным аналогам, а по некоторым показателям даже превосходят их.

A b s t r a c t. Background. The subject of this study is semiconductor pressure sensors and temperature. The aim of this work is to develop a distributed pressure sensors and temperature based on microelectromechanical systems for space hardware operating at high values of the external influencing factors. **Materials and methods.** The expediency of application of certain structural and technological solutions. **Results.** Given the developed design of the sensor. Conducted patent research proving the novelty of the application of developed technological solutions. **Conclusions.** The proposed construction of a semiconductor pressure sensor and temperature will increase the reliability and the payload of the spacecraft, technical and metrological characteristics of the sensor are not inferior to domestic and foreign analogues, and on some parameters even surpass them.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик давления и температуры, базовые несущие конструкции, микроэлектромеханическая система, чувствительный элемент, метрологические характеристики, полиимидный шлейф.

Key words: pressure and temperature sensor, the basic load-bearing structures, microelectromechanical system, sensing element, metrological characteristics, polyimide loop.

Введение

Рынок по предоставлению космических услуг является динамично развивающейся отраслью мировой экономики и, как следствие, услуги по разработке, запуску и обслуживанию космических аппаратов (КА) различного назначения становятся более востребованным. Мировые тенденции создания и пусков КА показывают ежегодное увеличение поднимаемой массы полезной нагрузки и различных видов исследовательского оборудования с одновременным увеличением срока активного существования, что вполне объяснимо с точки зрения снижения затрат на запуск ракет-носителей, КА, развертывание группировок спутников и космических обсерваторий, а также обслуживание международной космической станции.

В настоящее время активно ведутся работы в области проектирования и создания нового поколения бортовых систем, панелей приборов для спутников, космических аппаратов, ракет-носителей и космических обсерваторий, имеющих улучшенные тактико-технические характеристики, наподобие ГЛОНАСС-К, «Экспресс-АМ44», «Экспресс-МД-2», ракет-носителей семейства «Ангара», «Спектр-УФ» [1–3].

Одним из основных материалов в данных аппаратах для производства комплексных функционально-интегрированных композитных базовых несущих конструкций (БНК) является углепластик. Его главные преимущества: это малая плотность, высокие прочностные и жесткостные свойства, низкий коэффициент линейного термического расширения. Для получения оптимально спроектированной БНК из композитного материала (КМ) необходимо комплексное понимание влияния и точный контроль технологических факторов (режимы отверждения, термообработки, режимы газофазного осаждения и т.п.) на физико-механические и теплофизические свойства формируемого КМ. Для обеспечения эффективной длительной работоспособности БНК из КМ требуется контролировать не только технологические параметры изготовления, но и режимы эксплуатации [4].

Анализ предъявляемых требований к датчикам

Возможность подробного контроля и диагностики изделий ракетно-космической техники, а также отдельных параметров технологических процессов получения конструкций из КМ и состояния конструктивных элементов под влиянием внешних воздействующих факторов обеспечивается встраиванием в конструктивные элементы БНК системы распределенных датчиков, которые выполняют непосредственное преобразование величины внешних воздействующих факторов в электрический выходной сигнал (рис. 1). Электрический сигнал от нескольких распределенных по объекту измерения датчиков по аналоговым интерфейсам стекается в систему первичной обработки информации, в которой сигналы от датчиков преобразуются в унифицированный цифровой сигнал и затем по стандартным цифровым протоколам передачи данных поступают на блок обработки информации.

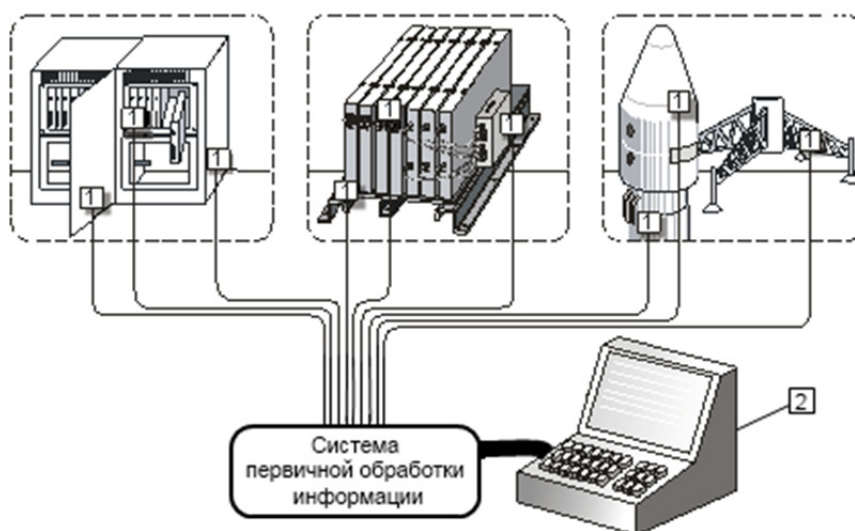


Рис. 1. Схема сбора информации: 1 – распределенные датчики; 2 – блок обработки информации

Данное конструктивно-технологическое решение позволяет осуществлять измерение в системах оперативного контроля внешних условий полета космических аппаратов и идентификации аварийных и катастрофических ситуаций на борту летательных аппаратов, системах оперативного определения пробоя техногенной частицей гермоотсеков международной космической станции и космических аппаратов.

Важное условие, предъявляемое к датчикам, – малые габариты и масса, так как их общее количество на одном изделии, особенно при стендовой и летно-конструкторской отработке, очень велико и может достигать нескольких сотен, что связано с большим числом контролируемых параметров и точек контроля [5].

В случае распределенного размещения датчиков непосредственно в БНК без изменения ее конструкции необходимо выполнение следующих требований:

- размер датчиков, внедряемых в объем материала, может быть не более $300 \times 300 \times 300$ мкм³ для минимизации искажения ячейки в связи с тем, что структурная ячейка материала имеет характерные размеры на уровне 200–300 мкм;

- наличие подводящих каналов для съема информации нежелательно;

- химическая инертность к компонентам БНК в широком диапазоне температур.

В случае распределенного размещения датчиков на поверхности БНК необходимо выполнение ряда условий:

- геометрические размеры определяются на основе компоновочно-геометрических и функциональных параметров всей конструкции, составной частью которой является КМ, и геометрических особенностей выбранной детали из КМ;

- датчики, компоненты БНК и подводящие каналы (при их наличии) должны быть химически инертны в широком диапазоне температур;

- температура работоспособности без искажения сигнала должна быть не менее 200 °С [4].

К метрологическим характеристикам датчиков предъявляются повышенные требования:

- погрешность в условиях эксплуатации не более 0,5 %;

- долговременная стабильность выходного сигнала не хуже 0,15 % в год;

- нормирующее значение выходного сигнала не менее 90 мВ;

- температурное смещение нуля $\pm 0,05$ %/°С.

В процессе вывода изделий ракетно-космической техники на орбиту датчики подвержены следующим воздействиям:

- линейные перегрузки: продольная до (± 10) g, боковая до (± 2) g в течение 10 мин по каждой оси;

- вибрационные перегрузки в диапазоне от 10 до 2500 Гц с ускорениями соответственно от 1 до 10 g. Суммарное действие по каждой оси – до 15 мин;

- ударные перегрузки в любом направлении до 40 g при длительности от 0,5 до 2 мс и количестве по пяти ударов в каждом направлении (всего 30 ударов по трем осям во взаимно противоположных направлениях).

Датчики должны удовлетворять вышеперечисленным требованиям и быть работоспособными в течение не менее 15 лет.

Реализация возможных методов решения

Реализация датчиков с предъявляемыми к ним требованиями при помощи традиционных методов изготовления (тонкопленочный, емкостный, индуктивный) невозможна. Выполнение данной задачи возможно только с применением микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые вобрала в себя все достижения микроэлектронной промышленности (материалы, оборудование, средства проектирования и т.д.). МЭМС-технологии позволяют создавать в едином технологическом цикле миниатюрные датчики, способные измерять в одной точке сразу несколько физических величин [6] и таким образом повысить информативную насыщенность о контролируемых параметрах, что предоставляет возможность их использования в системах распределенного контроля.

В рамках опытно-конструкторской работы (ОКР) «Разработка распределенного измерительного функционального модуля давления и температуры на основе наноэлектромеханических систем для встраивания в базовые несущие конструкции изделий ракетно-космической

техники и объектов наземной космической инфраструктуры» была проведена разработка распределенных датчиков давления и температуры на основе МЭМС. В ходе анализа выявлены следующие уникальные свойства датчиков, разработанных по данной технологии:

- миниатюрность размеров упругих элементов ($1000 \times 1000 \times 1000$ мкм), определяющая их малую механическую инерционность, из-за чего они имеют хорошие частотные свойства и малую чувствительность к механическим перегрузкам;

- методы обработки кремния позволяют выполнять детали и узлы исполнительных устройств с линейными размерами порядка 10 мкм с точностью ± 1 мкм, что недоступно для других конструкционных материалов (сталь, керамика, стекло и пр.) [7];

- возможность изготовления при помощи МЭМС-технологий приборов в виде монолитной конструкции (реализация принципа «самосборки»), что решает проблему сложности и высокой стоимости процесса установки и закрепления миниатюрных упругих элементов (мембран, балок) [7];

- возможность изготовления чувствительных элементов датчика, измеряющих несколько параметров (давление, температура, перемещение и др.) на одном кристалле [6];

- возможность нанесения пассивирующего слоя, позволяющего избавиться от загрязнений мембраны чувствительного элемента, появления миграционных потоков, вызванных воздействием окружающей среды на топологическую схему;

- микроэлектронная технология и использование поликристаллического кремния для чувствительных элементов определяют их более высокую надежность по сравнению с чувствительными элементами, изготовленными по традиционным методам.

Исходя из требований, необходимых для встраивания в БНК из КМ, можно сказать, что с существующими в России технологиями изготовление датчиков, внедряемых в объем материала, без искажения ячейки КМ невозможно, однако возможно производить монтаж на поверхности БНК с минимальными потерями пространства внутри КА. Для минимизации массы и объема, занимаемого датчиком, а также для обеспечения возможности распределенного размещения по площади БНК в ходе сравнительного анализа датчиков-аналогов [7] была разработана новая конструкция датчика, обеспечивающего измерение нескольких параметров (рис. 2). Данная конструкция состоит из следующих элементов:

- полупроводниковый чувствительный элемент, непосредственно воспринимающий давление и температуру измеряемой среды. Чувствительный элемент состоит из кристалла 1 с центральной тонкой мембраной, соединенного электростатическим способом в вакууме со стеклянным основанием 2, позволяющим создать вакуумированную полость 3, обеспечивающую измерение абсолютного давления, а также стеклянного изолятора, обеспечивающего изоляцию золотых проводников, и корпуса. С планарной стороны кристалла методом эпитаксиального выращивания наноструктурированного поликристаллического кремния сформированы четыре тензорезистора R1–R4, объединенные в мостовую цепь, терморезисторы R5, R6 обеспечивают термокомпенсацию канала давления и канал температуры. Минимально получаемые размеры чувствительного элемента составляют $1000 \times 1000 \times 1000$ мкм, однако в рамках ОКР он был разработан с размерами $4000 \times 5000 \times 1300$ мкм с выведенными на одну сторону контактными площадками для более удобной коммутации [9];

- плоский полиимидный шлейф, который может быть распределенно размещен на компонентах БНК без потери полезного объема и с минимальной потерей массы в связи с минимальной толщиной шлейфа 100 мкм, а также шириной 1000 мкм. Разработанный шлейф полностью повторяет конструкцию элементов БНК и крепится к элементам БНК при помощи клеевого соединения. Конструкция шлейфа позволяет использовать плоские соединители, а также возможно соединение шлейфа со шлейфом при помощи «флип-чип» технологии.

В ходе выполнения ОКР были проведены патентные исследования, позволяющие сравнить технический уровень разрабатываемого датчика с лучшими по технико-экономическим показателям датчиками зарубежного производства. В качестве аналогов выбраны:

- датчик давления ДДЭ 095 АО «НИИФИ», РФ;
- датчик давления LLE-5DC-500 Kulite, США;
- датчик давления SMD 500 Bosch Sensortec, Германия.

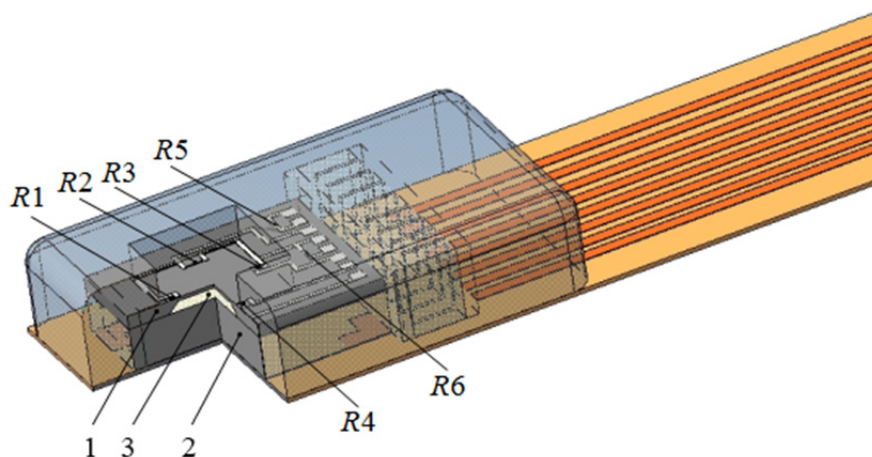


Рис. 2. Модель датчика давления и температуры, изготовленного по МЭМС-технологии

Результаты оценки технического уровня приведены в циклограмме (рис. 3), из которой можно сделать вывод, что технический уровень разрабатываемого датчика выше уровня аналогов ДДЭ 095 АО «НИИФИ», РФ, LLE-5DC-500 Kulite, США и SMD 500 Bosch Sensortec, Германия, по диапазону измерений, диапазону рабочих температур, диапазону измеряемых температур, погрешности измерения температуры.

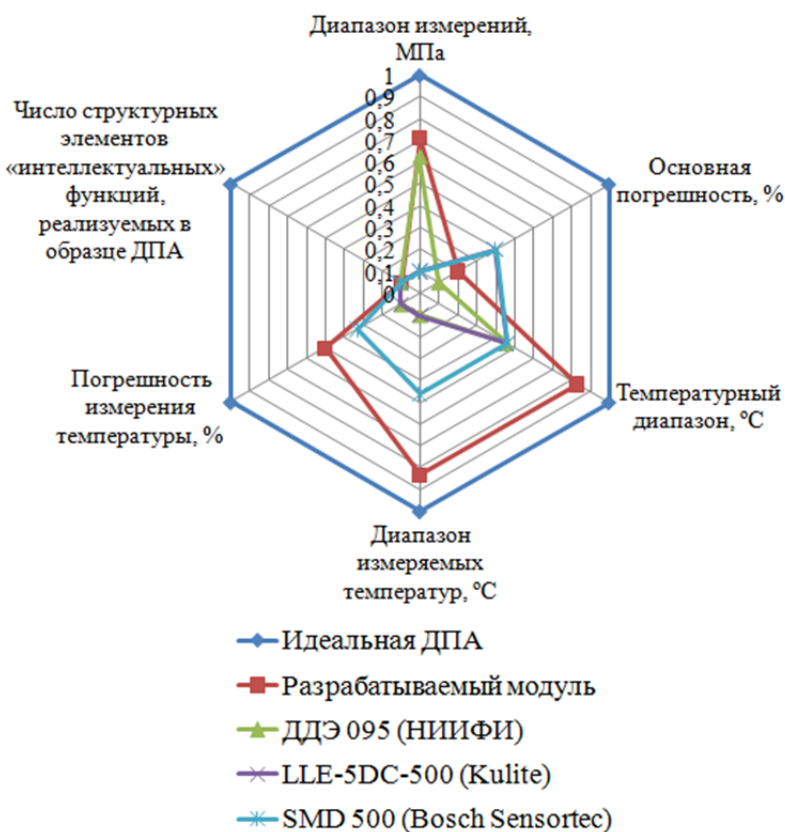


Рис. 3. Циклограмма сравнительных характеристик разрабатываемого датчика, его аналогов и идеальной датчикопреобразующей аппаратуры

Кроме того, разработанная конструкция датчика имеет ряд преимуществ, отличающих ее от датчиков-аналогов:

- возможность установки на поверхностях металлических и композитных БНК;
- наличие термокомпенсируемого канала давления и канала температуры;

- возможность распределенного размещения датчиков, прокладки кабельных сетей на металлических и неметаллических поверхностях изделий ракетно-космической техники со сложным рельефом;
- малые габариты и масса (менее 1 г);
- высокая радиационная стойкость.

Заключение

Разработка датчика давления и температуры, позволяющего диагностировать изменения основных характеристик БНК, произведена в рамках ОКР «Разработка распределенного измерительного функционального модуля давления и температуры на основе наноэлектромеханических систем для встраивания в базовые несущие конструкции изделий ракетно-космической техники и объектов наземной космической инфраструктуры». Его применение позволит увеличить надежность и полезную нагрузку космического аппарата, а технические и метрологические характеристики не уступают отечественным и зарубежным аналогам, а по некоторым показателям даже превосходят их [5, 7]. Требования, предъявляемые к распределенным датчикам, подтверждены предварительными испытаниями и испытаниями на воздействие радиации до 100 крад. Рабочей конструкторской документации присвоена литера «О».

Библиографический список

1. Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический научно-производственный центр им. М. В. Хруничева». – URL: <http://www.khrunichev.ru/>
2. Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева». – URL: <http://www.npopm.ru/>
3. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение им. С. А. Лавочкина». – URL: <http://www.laspace.ru/>
4. Научно-технический отчет № 0240-98 от 15.06.2012 «Разработка и внедрение базовых технологических процессов изготовления неметаллических элементов базовых несущих конструкций из полимерных композиционных материалов и керамоматричных композиционных материалов с встроенными функционально распределенными измерительными и функциональными модулями», ОАО «Композит». – Королев, 2012.
5. Технические требования к космическому аппарату «Экспресс-АМУ2». – URL: http://www.rscs.ru/files/images/tt_amu2.pdf
6. Блинов, А. В. Интегральный датчик давления, ускорения и температуры на базе МЭМС-технологий / А. В. Блинов, А. Е. Мишанин, С. А. Москалев, И. В. Ползунов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. – 12.
7. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики : пер. с англ. / Р. Г. Джексон. – М. : Техносфера, 2007.
8. Васильев, В. А. Состояние и перспективы создания полупроводниковых микроэлектромеханических систем и датчиков давления на их основе / В. А. Васильев, С. А. Москалев, И. В. Ползунов, В. А. Шокоров // Метрология. – 2014. – № 11. – С. 15–24.
9. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2014630011. Измерительный функциональный преобразователь давления и температуры / Ползунов И. В., Родионов А. А., Шокоров В. А. Зарегистрировано в реестре ТИМС 09.01.2014. Приоритет от 06.11.2013.

Шокоров Вадим Александрович

инженер-конструктор,
 Научно-исследовательский институт
 физических измерений
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
 E-mail: Shokorov58@gmail.com

Shokorov Vadim Aleksandrovich

design engineer,
 Scientific-research Institute
 of physical measurements
 (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.781.2:629.7

Шокоров, В. А.

Разработка и применение датчиков давления и температуры на основе микроэлектромеханических систем для изделий ракетно-космической техники / В. А. Шокоров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 60–66. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-9.