

К. т. н. А. А. АЛТУХОВ, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,  
А. В. МОГУЧЕВ, А. Б. МИТЯГИНА

Россия, г. Москва, Производственно-технологический центр  
«УралАлмазИнвест»; г. Фрязино, Институт радиотехники и электроники  
E-mail: alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию  
02.06 2009 г.

Оппонент д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН  
(ЦНИТИ «Техномаш», г. Москва)

## ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ МИКРОДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ И ДАВЛЕНИЯ НА АЛМАЗНЫХ МАТЕРИАЛАХ

*Описана методика расчета и экспериментальный способ определения основных параметров микродатчиков. Рассчитанные значения емкости первичных преобразователей датчиков хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Установлено, что емкость практически линейно зависит от измеряемого параметра.*

В современной микроэлектронике широко используется кремний и его соединения, однако их механические и трибологические характеристики недостаточно высоки. Это заставляет разработчиков искать новые материалы для создания эффективных микросенсоров и устройств типа МЭМС (микроэлектромеханические системы), предназначенных для жестких условий эксплуатации, например в космосе, в составе атомной техники, при высоких тепловых и механических нагрузках и т. п.

Уникальная комбинация свойств алмаза, таких как высокая механическая и электрическая прочность, высокая теплопроводность, низкий коэффициент трения, химическая инертность, радиационная стойкость и способность работы при высоких температурах, делает его идеальным материалом для использования в МЭМС, в частности в датчиках ускорения и давления. Применение алмаза в качестве конструкционного материала первичных преобразователей (ПП) позволит создавать уникальные датчики, способные работать в условиях жестких дестабилизирующих факторов. Замена кремния на алмаз при неизменной кинематической схеме ПП позволяет увеличить прочность конструкции минимум в 40 раз, повысить собственную частоту ее колебаний минимум в 2 раза. Высокая теплопроводность и низкий ТКЛР позволят в несколько раз снизить аддитивную погрешность ПП.

Прогноз применения алмаза как материала с уникальными свойствами для создания полупроводниковых приборов, а затем и МЭМС, был сделан давно. Однако отсутствие эффективной технологии его прецизионной обработки остается основной проблемой применения алмаза в реальных конструкциях. Тем не менее, в последние годы появились публикации и патенты на чувствительные элементы микродатчиков на алмазных материалах [1—6]. Решению данной проблемы посвящена и настоящая статья.

### Конструкция и технология изготовления первичных преобразователей датчиков давления и ускорения

Конструктивно ПП разработанных датчиков представляют собой конденсатор, образованный неподвижной пластиной и подвижной мембраной (чувствительным элементом) датчика, емкость которого меняется при изменении давления или ускорения. В качестве конструктивного материала использовались алмазные слои толщиной 2—3 и 12—14 мкм, нанесенные на кремниевые пластины.

На рис. 1 представлены конструктивные схемы первичных преобразователей датчиков давления и ускорения.

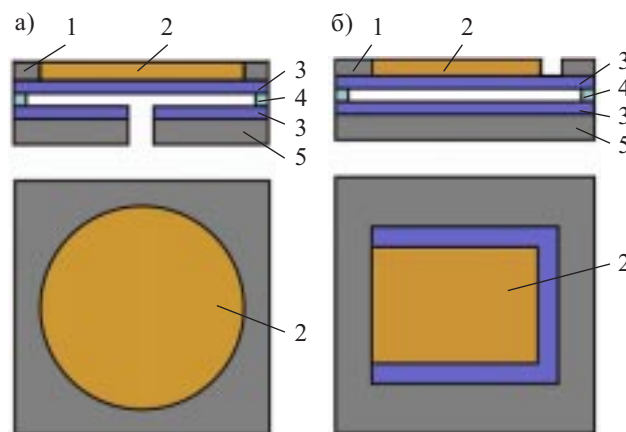


Рис. 1. Конструктивные схемы первичных преобразователей датчиков давления (а) и ускорения (б)

На нижней кремниевой пластине 5 расположены алюминиевые проводящие обкладки 3 и столбики 4 из термоусадочной полиуретановой пленки (для разделения пластин конденсатора). На верхней кремниевой пластине 1 расположен активный алмазный чувствительный элемент 2, который вместе с нижней пластиной образует конденсатор. В датчике давления чувствительным элементом является алмазная мембрана, а в датчике ускорения — консоль.

На рис. 2 представлены мембранная конструкция чувствительного элемента алмазного датчика давления, впервые предложенного специалистами США [5], и мембранно-балочная конструкция чувствительного элемента датчика ускорения, предложенная нашими специалистами.

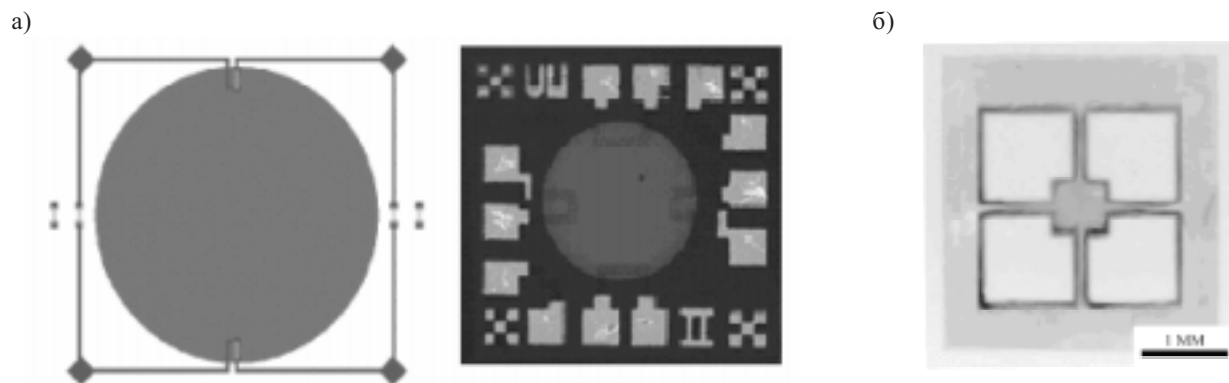


Рис. 2. Конструкция чувствительных элементов датчиков давления (а) и ускорения (б)

Технологический процесс изготовления чувствительных алмазных элементов датчиков состоял из следующих этапов [7]:

- селективное осаждение алмазной пленки, легированной бором;
- травление кремниевого основания;
- создание мембраны для датчика давления и изготовление алмазной пластины (резка, полировка);
- термохимическая обработка поверхности;
- прецизионная лазерная резка;
- плазмохимическое травление упругих элементов (торсионов) для датчика ускорения.

В законченном виде ПП датчиков давления и ускорения монтировались в металлокерамический корпус ДИП-16 на жесткое основание из полимеризованной эпоксидной смолы. Внешние выводы в разводились в корпусе при помощи золотой проволоки диаметром 25 мкм методом ультразвуковой микросварки. На контактные площадки корпуса монтаж осуществлялся методом термокомпрессии.

Используя известные методы теории сопротивления материалов, в частности метод, основанный на универсальном уравнении упругой линии балки [8], были рассчитаны статические характеристики и определен диапазон регистрируемых ускорений чувствительного элемента консольного типа с концентратором массы. Расчеты проводились для следующих исходных данных: длина балки  $L=3,5 \cdot 10^{-3}$  м, ширина  $b=3,5 \cdot 10^{-3}$  м, толщина  $h=12 \cdot 10^{-6}$  м; расстояние между обкладками конденсатора  $d=1 \cdot 10^{-5}$  м.

Аналогично, используя уравнения прогиба мембраны, были рассчитаны статические характеристики и

определен диапазон регистрируемых величин давления для следующих исходных данных: радиус и толщина мембраны  $R=3,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $h=12 \cdot 10^{-6}$  м, расстояние между обкладками конденсатора  $d=1 \cdot 10^{-5}$  м.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости емкости ПП датчиков давления и ускорения от измеряемых величин.

### Измерения

Для измерения параметров экспериментальных образцов датчиков ускорения был разработан специальный стенд [7]. Стенд состоит из преобразователя «емкость—код», устройства управления и сбора информации и источника питания. Преобразователь «емкость—код» предназначен для выработки цифрового кода, соответствующего измеряемому физическому параметру датчика — емкости. Устройство управления и сбора информации выполняет следующие функции: настройку преобразователя «емкость—код» в соответствии с заданием, полученным от персонального компьютера; прием информации об измеряемом параметре с преобразователя «емкость—код»; выдачу информации об измеряемом параметре в персональный компьютер. Источник питания вырабатывает необходимое для работы напряжение питания.

Алгоритм работы следующий. В соответствии с заданной программой измерений персональный компьютер выдает в канал RS232 информацию, необходимую для настройки преобразователя «емкость—код». Устройство управления и сбора информации получает ее и использует при выполнении измерений. Далее персональный компьютер инициирует выполнение измерения выдачей соответствующей коман-

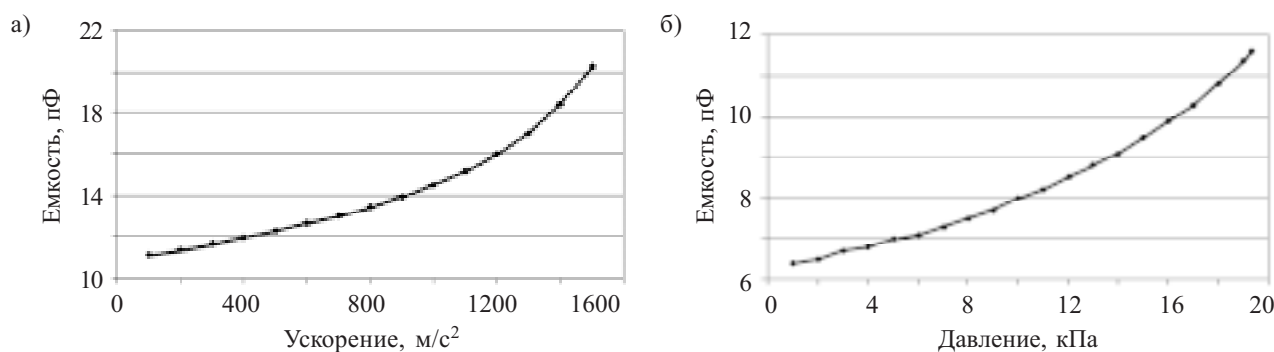


Рис. 3. Расчетная зависимость емкости ПП датчика ускорения (а) и датчика давления (б) от измеряемых величин

ды в канал RS232. Приняв команду на выполнение измерения, устройство управления и сбора информации выдает в канал I2C настроечную информацию для преобразователя «емкость—код», ожидает окончания выполнения преобразования, считывает результат и отправляет его на персональный компьютер. Персональный компьютер в соответствии с заданной программой производит необходимые вычисления и отображает результат на дисплее. Программное управление и двухсторонний цифровой обмен системы регистрации параметров позволяют адаптировать программу к различным областям применения.

Емкостные датчики обладают высокой точностью и довольно низкой стоимостью. Однако разработчики, решившие использовать емкостные датчики в своей конструкции, вынуждены будут предусмотреть сначала преобразование емкости в напряжение, а затем преобразование этого напряжения в цифровой сигнал с помощью прецизионного АЦП. Существует и новый подход — преобразование емкости в код с помощью сигма-дельта-модулятора, который обычно является частью прецизионного АЦП.

Нами был использован преобразователь AD7746, который имеет диапазон измеряемой емкости  $\pm 4$  пФ. Этот диапазон можно «сместить» на 17 пФ за счет конфигурирования преобразователя. Типичная величина разрешающей способности в диапазоне  $\pm 4$  пФ составляет 18 разрядов (без дрожания). Интегральная нелинейность преобразователя «емкость—код» не хуже 0,01%, за счет заводской калибровки погрешность измерения не превышает 4 фФ ( $4 \cdot 10^{-15}$  Ф). Принцип действия преобразователя состоит в том, что прямоугольный сигнал внутреннего источника возбуждения через емкость, которую необходимо измерить, подается на вход сигма-дельта-модулятора, конвертирующего этот сигнал в поток бинарных данных, пропорциональных величине измеряемой емкости. Преобразователь этого типа предназначен для обслуживания одиночных и дифференциальных емкостных датчиков с «плавающими» (не соединенными с шиной «земли») обкладками, что характерно для широкого класса микроэлектромеханических датчиков.

Функцию устройства управления и сбора информации выполняет микроконтроллер PIC18F252. В соответствии с заданным алгоритмом микроконтроллер управляет работой функциональных частей системы регистрации параметров. По отношению к преобразователю «емкость—код» микроконтроллер является ведущим, т. е. он является инициатором обмена и осуществляет формирование управляющих сигналов и прием информации. Обмен информацией производится по шине I2C в соответствии с требованиями интерфейса I2C. По отношению к персональному

компьютеру микроконтроллер является ведомым. Обмен между микроконтроллером и персональным компьютером осуществляется по каналу RS232.

Рассчитанное значение емкости 11 пФ для ПП датчика ускорения хорошо согласуется с экспериментальными значениями. Рабочий диапазон измерения ускорения — от 100 до 1800 м/с<sup>2</sup>, при этом емкость изменяется практически линейно в диапазоне 11—20,5 пФ.

Для ПП датчика давления рассчитанное значение емкости 7 пФ так же соответствует экспериментальным значениям. Рабочий диапазон измерения давления — от 1 до 19,5 кПа, при этом емкость практически линейно изменяется в диапазоне 6,4—11,7 пФ.

\*\*\*

Таким образом, расчеты конструкции чувствительных элементов датчиков динамических параметров подтвердили, что использование алмазных материалов позволит значительно расширить диапазон измеряемых величин и полосу пропускания частот. Разработанные и представленные ПП датчиков на основе алмазных материалов могут стать основой построения контрольно-измерительных устройств для обеспечения эффективной работы ракетно-космического, авиационного и специального оборудования при воздействии агрессивных факторов внешней среды, таких как радиация, предельные механические нагрузки, повышенные или пониженные температуры.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 5170668 США. Unit for measuring or other device / Barbara L. Jones; Filed. — Aug. 19, 1991.
2. Пат. WO 01/057295 A1 США. Patterning of nanocrystalline diamond films for diamond microstructures useful in MEMS and other devices / Krauss, Alan R. — 2001.
3. Пат. WO 01/077694 A1 США. Ultrananocrystalline diamond cantilever wide dynamic range acceleration/vibration/pressure sensor / Krauss, Alan R. — 2001.
4. Пат. EP 1271155 A1 США. Micromechanical component comprising a diamond layer, and production process / Krauss, Alan R. — 2003.
5. Проспект Research Program on Diamond Based Pressure Sensors and Accelerometers/ Funded by NASA, USAF (<http://www.vuse.vanderbilt.edu/~wkang/Diamond-PressureSensors-Accelerometers.pdf>).
6. Алтухов А. А., Митягин А. Ю., Митягина А. Б. Микродатчики ускорения на алмазных материалах // Труды XIV Междунар. науч. техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России». — Москва. — 2008. — С. 188—195.
7. Митягин А. Ю., Алтухов А. А., Митягина А. Б. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной электроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 1(79). — С. 53—58.
8. Федосьев В. И. Соппротивление материалов. — М.: Наука, 1972.