

Тензорезистивные МЭМС-преобразователи давления и модули на их основе

*Д.В. Гусев^{1,2}, Н.Л. Данилова^{1,2}, Р.С. Литвиненко¹,
Ю.А. Михайлов¹, В.В. Панков³, В.С. Суханов^{1,2}*

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²НПК «Технологический центр» (г. Москва)

³Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (г. Москва)

Tensoresistive MEMS Pressure Transducers and Modules Based on Them

*D. V. Gusev^{1,2}, N. L. Danilova^{1,2}, R. S. Litvinenko¹,
Y. A. Mihaylov¹, V. V. Pankov³, V. S. Sukhanov^{1,2}*

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow

²SMC «Technological Centre», Moscow

³INME RAS, Moscow

Представлены результаты разработки группы тензорезистивных преобразователей давления, изготовленных по технологии объемной микрообработки кремния. Рассмотрены одноканальные преобразователи абсолютного и избыточного давления на основе сложнопрофилированных мембран со встроенной защитой от перегрузки. Показаны их преимущества по сравнению с преобразователями давления, созданными на основе кремниевых плоских мембран и мембран с жестким центром. Описан многоканальный сканер давления для измерения давления на поверхности моделей летательных аппаратов при проведении испытаний в аэродинамической трубе. Приведены конструктивно-технологические принципы создания многоканальных модулей для измерения газодинамических потоков. Представлены матрицы чувствительных элементов давления и модули на их основе для тактильных датчиков, а также конструкция кремниевой матрицы чувствительных элементов давления и модулей на их основе, предназначенных для использования в составе установки тактильной диагностики внутренних органов при проведении операций малоинвазивной хирургии.

Ключевые слова: многоканальный сканер давления; МЭМС; тактильный датчик; тензорезистивный преобразователь давления.

The results of development of the group of tensorresistive pressure transducers manufactured by the bulk micromachining technology have been presented. The following products have been considered: single-channel transducers for absolute and gauge pressure based on the complex shaped membranes with the built-in overload protection. The advantages of the developed sensors in comparison with the pressure transducers, created on the basis of silicon planar membranes and the membrane with a rigid center have been shown; multi-channel pressure scanner for measuring pressure on the

surface of the aircraft models tested in a wind channel. The constructive-technological principles of creating the multi-channel modules for measurement of gas-dynamic flows have been presented; the matrices of the pressure sensitive elements and modules based on them for tactile sensors have been presented. The structure of the silicon matrix of pressure sensitive elements and modules based on them, intended for use in the system for tactile diagnostics of internal organs during operations of minimally invasive surgery have been presented.

Keywords: multi-channel pressure scanner; MEMS; tactile sensor; tensoresistive pressure transducer.

Введение. Преобразователи давления в составе датчиков находят широкое применение в нефтегазовой отрасли, атомной энергетике, медицине, авиационной, космической промышленности и военной аппаратуре. Независимо от области применения преобразователи давления должны обеспечивать хорошие метрологические характеристики по чувствительности, номиналу измеряемого давления, по стабильности работы и температурным ограничениям.

Кристаллы кремниевых интегральных тензопреобразователей давления (ИПД), выпускаемые в НПК «Технологический центр», используются в составе датчиков давления в качестве первичного преобразователя измеряемой механической величины в пропорциональный электрический сигнал – выходное напряжение. На основе кристаллов ИПД создаются преобразователи абсолютного, избыточного и дифференциального давления для измерения сухих неагрессивных сред в диапазоне 0,0025–10 МПа, а также маслonaполненные преобразователи давления для измерения жидких сред.

Одноканальные преобразователи давления. Кристаллы ИПД, являющиеся основой преобразователей, представляют собой тонкую упругую мембрану, формируемую с помощью анизотропного травления, на лицевой стороне которой сформированы тензорезисторы, схемы разводки и термокомпенсации. Кремний в качестве материала кристалла преобразователя давления хорошо зарекомендовал себя, так как он имеет ряд преимуществ: простота используемых технологических процессов при изготовлении конструкции, отсутствие гистерезиса по нагрузке и достаточно высокий выходной сигнал.

Для улучшения метрологических характеристик, увеличения параметров по чувствительности и нелинейности и получения широкого диапазона измеряемого давления используется конструкция чувствительного элемента на основе кристаллов со сложнопрофилированной мембраной [1]. Вместо кристаллов преобразователей с плоской мембраной и мембран с одним жестким центром используются мембраны с распределенным жестким центром с несколькими концентраторами напряжений. Применение конструкции кристалла ИПД со сложнопрофилированной мембраной имеет неоспоримые преимущества по сравнению с конструкциями без концентраторов: высокий выходной сигнал; минимальный температурный гистерезис и нелинейность, вследствие чего удается получить воспроизводимые преобразователи давления с верхним пределом измерения от 2,5 до 25 кПа для кристалла ИПД-5,2 (размер кристалла 6,2×6,2 мм) и от 0,04 до 2,5 МПа для кристалла ИПД-6 (размер кристалла 4×4 мм).

Различные типономиналы тензопреобразователя по давлению реализуются за счет изменения толщины мембраны. Однако при создании многодиапазонных датчиков давления возникает проблема перегрузочной способности преобразователей. По условиям сборки датчиков тензорезистивный кристалл ИПД должен выдерживать перегрузки, значительно превышающие номинальное давление. Особенно это

критично для чувствительных элементов на давление ниже 10 кПа при использовании более тонких кремниевых мембран. Для них требуемое значение перегрузочного давления $\cong 140$ кПа.

Для решения данной проблемы разработана конструкция чувствительного элемента давления с повышенной перегрузочной способностью. В стандартную конструкцию чувствительного элемента давления введена защитная прокладка с выступами, на которые должна лечь мембрана при превышении нагрузочного давления. По расчетам определена величина прогиба мембраны при действии номинального давления «на отрыв» (рис.1). Величина прогиба составляет 12–15 мкм в зависимости от толщины мембраны. Соответственно опорный уступ, на который ложится мембрана при перегрузке, должен иметь заглубление на такую же величину. Аналогично решается проблема с защитой от перегрузки сверху «на прижим». Реализована экспериментальная конструкция. Значение предельного перегрузочного давления (давления разрушения) «на прижим» составило 2,1–2,8 МПа, значение предельного перегрузочного давления «на отрыв» – 1,3–1,76 МПа.

Реализация сложной конструкции двойной защиты от перегрузки возможна при использовании технологии соединения кремниевых деталей заданного профиля методом низкотемпературной пайки в вакууме.

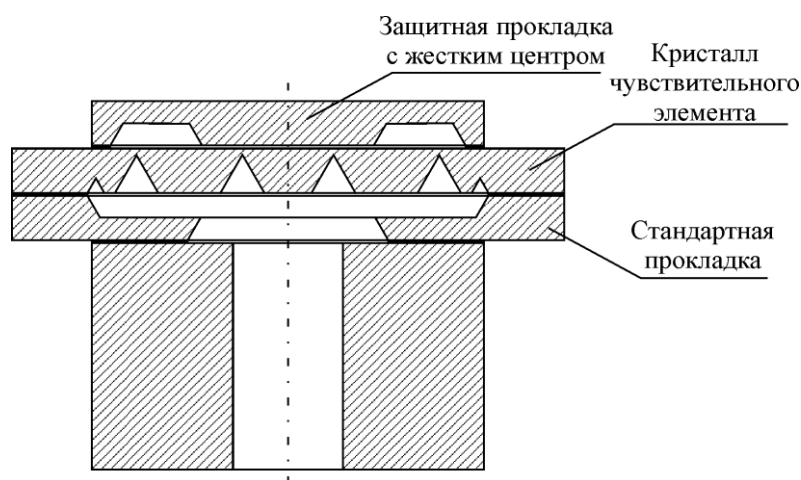


Рис.1. Конструкция чувствительного элемента давления с защитой от действия перегрузочного давления снизу

Многоканальные преобразователи давления. Помимо одноканальных преобразователей давления возникает необходимость использования многопоточного измерения давления. Например, в авиационной сфере при аэродинамических исследованиях летательных аппаратов активно используются многоканальные преобразователи давления (рис.2). К ним предъявляются следующие требования: малогабаритность, низкое энергопотребление, многоточечность и единообразие измерений.

На основе одноканальных преобразователей давления в НПК «Технологический центр» разработана комплексная система для многоканального исследования давления, малогабаритный 16-канальный сканер давления [2] с цифровым выходом с интерфейсом RS-232. В корпусе размерами 57×21×9 мм располагается 16 тензорезистивных чувствительных элементов малых размеров, АЦП для обработки аналогового сигнала и микроконтроллер. Многоканальный сканер рассчитан на измерение давления в диапазоне 0–10 кПа, 0–40 кПа, 0–100 кПа (рис.3).

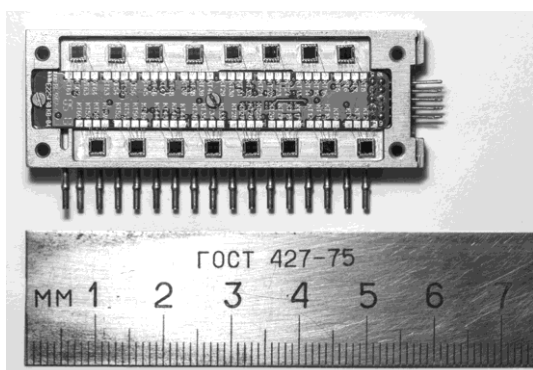


Рис. 2. Общий вид многоканального сканера давления

В медицине получают развитие методы малоинвазивной хирургии, которые позволяют избегать больших разрезов, необходимых при открытых операциях [3]. Таким образом уменьшается потеря крови, снижается риск инфицирования, сокращается период восстановления, улучшаются косметические результаты. Однако при лапароскопических операциях хирург не имеет возможности прямой пальпации тканей и органов. Для дальнейшего развития малоинвазивной хирургии необходимо создание приборов, способных предоставлять тактильную информацию.

Для этих целей используются специально разработанные матрицы чувствительных элементов давления для применения в составе аппарата тактильной диагностики, предназначенного для использования во время хирургических операций.

Матрица – это кремниевый кристалл, на котором расположены 7 или 19 интегральных преобразователей давления с размером мембраны 900×900 мкм и толщиной (18 ± 3) мкм. Каждый преобразователь представляет собой тензорезистивный мост, рассчитанный на работу в диапазоне давлений 0–40 кПа, с чувствительностью 0,4–0,7 мВ/В/кПа [4]. Используя циклы объемной микрообработки кремния, удалось придать матрицам габариты, необходимые для использования эндоскопов стандартных диаметров (МИПД-7 – 10 мм, МИПД-19 – 20 мм). Матрица предназначена для преобразования локальных давлений в электрический сигнал, который в дальнейшем обрабатывается и представляется в удобной для восприятия форме.



Рис. 3. Общий вид электронного модуля МИПДМ-7

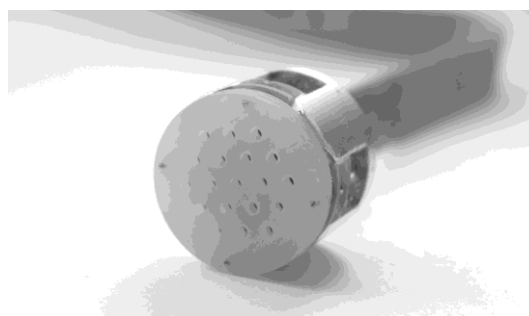


Рис. 4. Общий вид электронного модуля МИПДМ-19

На основе матриц разработаны электронные модули МИПДМ-7 (см. рис. 3) и МИПДМ-19 (рис. 4), в состав которых входят средства обработки выходного сигнала матрицы.

Заключение. Развитие тактильной диагностики поможет достичь более широкого применения методов малоинвазивной хирургии для лечения социально значимых заболеваний.

Литература

1. Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилированных кремниевых мембран / *Н.С. Землянников, Н.Л. Данилова, В.В. Панков и др.* // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 4. – С. 32–35.
2. *Гусев Д.В., Данилова Н.Л., Землянников Н.С., Суханов В.С.* Многоканальные тензорезистивные преобразователи давления // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 6. – С. 25–27.
3. *Preusche C., Ortmaier T., Hirzinger G.* Teleoperation concepts in minimal invasive surgery // Control Eng. Practice. – 2002. – Vol. 10. – P. 1245–1250.
4. Разработка и создание опытных образцов искусственных тактильных механорецепторов для эндоскопии / *В.В. Амеличев, В.М. Буданов, Д.В. Гусев и др.* // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 2. – С. 30.

Статья поступила
4 июня 2015 г.

Гусев Дмитрий Валентинович – старший научный сотрудник НПК «Технологический центр» (г. Москва), инженер научно-исследовательской лаборатории интегральных технологий (НИЛ ИТ) МИЭТ. *Область научных интересов:* промышленная автоматика, датчики физических величин, системы обработки данных, МЭМС. **E-mail:** gusev@tcen.ru

Данилова Наталья Леонтьевна – старший научный сотрудник НПК «Технологический центр» (г. Москва), научный сотрудник НИЛ ИТ МИЭТ. *Область научных интересов:* промышленная автоматика, датчики физических величин, системы обработки данных, МЭМС.

Литвиненко Роман Сергеевич – студент МИЭТ. *Область научных интересов:* промышленная автоматика, датчики физических величин, системы обработки данных, МЭМС.

Михайлов Юрий Александрович – кандидат технических наук, руководитель группы опытного производства НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* МЭМС-технологии, нано- и микросистемная техника.

Панков Владимир Валентинович – младший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (г. Москва). *Область научных интересов:* МЭМС-технологии, первичные преобразователи давления, конструкции кристаллов первичных преобразователей давления.

Суханов Владимир Сергеевич – начальник лаборатории НПК «Технологический центр» (г. Москва), научный сотрудник НИЛ ИТ МИЭТ. *Область научных интересов:* промышленная автоматика, датчики физических величин, системы обработки данных, МЭМС.