На правах рукодиси

Козлов Александр Ипатьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕМБРАННЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ульяновск – 2014

Работа выполнена на кафедре Измерительно вычислительные комплексы Ульяновского государственного технического университета.

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент, Киселев Сергей Константинович
Научный консультант:	доктор технических наук, профессор, Стучебников Владимир Михайлович

Официальные оппоненты: Мокров Евгений Алексеевич,

доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет, кафедра «Приборостроение», профессор

Винокуров Лев Николаевич,

кандидат технических наук, ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», начальник тематической комплексной бригады ТКБ-222

Ведущая организация:

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН, г. Ульяновск

Защита состоится « <u>28</u> » <u>января</u> 2015 г. в <u>15</u> часов <u>00</u> минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета. Также диссертация и автореферат размещены в Internet на сайте УлГТУ - http://www.ulstu.ru/

Автореферат разослан «<u>28</u>» ноября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор

Смирнов Виталий Иванович

<u>Актуальность темы диссертационного исследования.</u> Давление – один из важнейших параметров, контролируемых в технологических процессах практически всех отраслей экономики: на предприятиях нефтедобывающего и перерабатывающего комплекса, в современной энергетике, в том числе атомной, в металлургии, пищевой промышленности, машиностроении, жилищно-коммунальном хозяйстве и других отраслях, а также в научных исследованиях, например, геофизических.

Согласно данным научно-технической литературы, в большей части применяемых датчиков давления используются тензорезисторные преобразователи (ТП) давления. Практически во всех ТП используются мембранные упругие элементы (УЭ) чашечного типа, воспринимающие давление, на которых закреплены тензорезисторы (ТР), изменяющие свое сопротивление под действием деформации мембраны. В таких приборах УЭ может изготавливаться из металла, керамики или из монокристаллического кремния, а тензорезисторы могут быть выполнены по тонкопленочной технологии, сформированы в объемном кремнии или выполнены по технологии «кремний на сапфире» (КНС).

Важнейшей задачей при разработке ТП давления является определение такого места расположения ТР на поверхности мембраны и такой формы ТР, при которых изменение их сопротивления $\Delta R/R$ (точнее разности изменений сопротивлений ТР в смежных плечах моста) максимально. Путем оптимизации топологии тензочувствительной схемы ТП можно минимизировать нелинейность и вариацию выходного сигнала ТП и увеличить его выходной сигнал и перегрузочную способность.

Изучение научно-технической литературы, патентной документации, защищенных диссертаций, а также материалов конференций показало, что, многолетнюю практику разработок и несмотря на многомиллионное производство ТП, вопросы оптимального расположения тензорезисторов на поверхности мембран изучены недостаточно. Систематических исследований реального распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента чашечного типа как экспериментальных, так и расчетных, до начала 2000-х годов не проводилось. Отсутствие решений указанных вопросов на сегодняшний день не позволяет разработчикам датчиковой аппаратуры оперативно разрабатывать новые типы приборов И модернизировать имеющиеся под конкретные запросы рынка, а также снизить временные и материальные затраты на разработку приборов. Выбранная тема исследований пробел данной области знаний, восполняет В что и определяет ee актуальность.

<u>Степень разработанности темы исследования.</u> Разработке мембранных тензопреобразователей давления посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых.

3

Вопросам проектирования упругих элементов ТП давления уделялось большое внимание в трудах Л.Е. Андреевой, В.И. Белоглазова, Е.М. Белозубова, В.И. Ваганова, В.А. Васильева, В.А. Гридчина, В.В. Грищенко, В.И. Евдокимова, Ю.А. Зеленцова, Г.И. Лурье, В.М. Любимского, Е.А. Мокрова, Е.П. Осадчего, В.М. Стучебникова, В.И. Суханова, А.И. Тихонова, В.А. Тихоненкова, А.В. Шапорина, А.Г. Шатдиной и других. Большой вклад в проектирование тензопреобразователей давления также внесли иностранные ученые: Allan R., Asch G., Bretschi J., Brindley K, Henning W., Lee K.W., Mitsuoka Y., Nishihara M., Terston R., Wise K.D., Yamada K. и другие.

Однако в трудах указанных ученых вопрос оптимизации расположения тензорезисторов на поверхности мембран решался частично. либо не рассматривался совсем, так как всегда считалось, что распределение деформаций в мембранных упругих элементах чашечного типа достаточно точно описывается аналитическими выражениями из теории пластин и оболочек, проработанными, например, С.П. Тимошенко и С. Войновски-Кригером. В последнее время в научной литературе появляются статьи, в которых авторы предлагают различные численные модели ТП, заменяющие аналитические, при которых получаются более приближенные расчетные и экспериментальные результаты. Среди них можно отметить коллективные работы Yan-Hong Zhang, Chen Yang, Zhao-Hua Zhang, Hui-Wang Lin, Li-Tian Liu, Tian-Ling Ren; М.А. Барулиной, В.Э. Джашитова, В.М. Панкратова; К.А. Андреева, Ю.Н. Тихонова, В.А. Шахнова. При этом эти работы охватывают только какие-либо частные случаи, и по большей части, представляют результаты теоретических расчетов, не подтвержденных экспериментальными данными.

В рамках выбранной темы были сформулированы цель и задачи исследования.

<u>Цель диссертационного исследования</u> – Разработка мембранных ТП давления с улучшенными метрологическими характеристиками (сниженными нелинейностью, вариацией и температурным дрейфом, повышенной чувствительностью) на основе теоретико-экспериментального исследования особенностей распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента и изменения сопротивления тензорезисторов под действием давления и температуры.

Достижение поставленной цели обеспечивалось решением следующих задач:

- 1. Изучение различных теоретических моделей упругих элементов ТП давления, применяемых в описании функционирования ТП давления с мембранами чашечного типа.
- 2. Выявление отличий результатов расчетов характеристик упругих элементов реальных ТП с распределенными параметрами методом конечных элементов от результатов расчета моделей тонких пластин и оболочек, жестко закрепленных по периферии и нагруженных давлением, или сосредоточенной силой.

- 3. Проведение экспериментального исследования распределения изменения сопротивления и ТКС ТР на поверхности ПЧЭ для различных конструктивов упругих элементов ТП на основе структур КНС.
- 4. Получение профилей деформаций механического происхождения на поверхности ПЧЭ для различных конструктивов упругих элементов ТП.
- 5. Проверка адекватности численной математической модели путем сравнения результатов расчета профилей деформаций в УЭ с полученными экспериментальными данными.
- 6. Разработка на основе полученных данных оптимизированных ТП на основе КНС, исследование их метрологических свойств.

<u>Методология и методы исследования.</u> Поставленные в работе задачи решены с использованием теории упругости, теории планирования эксперимента, теории погрешностей и статистического анализа, методов математического моделирования, методов регрессионного анализа, а также других методов научного познания, таких как: измерение, сравнение, анализ и синтез и др. Достоверность разработанных научных положений и выводов подтверждена результатами опытных испытаний образцов общепромышленных датчиков давления МИДА.

Научная новизна диссертационной работы заключается в:

- 1. Впервые экспериментально исследованы распределения изменения сопротивления тензорезисторов под действием давления и температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов по поверхности УЭ чашечного типа для одно- и двухмембранных ТП.
- 2. Показано, что деформированное состояние УЭ чашечного типа не описывается аналитическими выражениями, справедливыми для тонких круглых мембран, жестко защемленных по контуру.
- 3. Предложено конструктивное решение оптимизации ТП, позволяющее значительно повысить их метрологические характеристики.
- 4. Разработаны новые типы унифицированных ПЧЭ, обеспечивающих уменьшение температурной погрешности нулевого сигнала ТП и снижающих себестоимость изготовления ТП.

Практическая значимость работы заключается:

- 1. В экспериментальном подтверждении того, что широко используемое аналитическое описание распределения деформаций на поверхности мембранного ТП давления не дает достоверных результатов, так как деформации распространяются далеко в основание УЭ за границу мембраны, особенно при больших значениях отношения толщины мембраны к ее диаметру.
- 2. В оптимизации конструкций УЭ тензопреобразователей, позволившей снизить нелинейность (в 1,2-1,6 раза) и вариацию (в 3-7 раз) выходного сигнала серийных ТП давления МИДА.
- 3. В разработке ПЧЭ на основе структур КНС №МД-010, использование которого позволило снизить температурный дрейф нулевого сигнала серийных ТП давления МИДА (в 2,5-3 раза).

4. В разработке ПЧЭ на основе структур КНС №МД-012, имеющего в 3,3 раза меньшую площадь по отношению к ранее использованным ПЧЭ, использование которого позволило:

- вдвое уменьшить нижний предел измеряемых давлений датчиков давления МИДА (до 1,6-2,5 кПа);

- заменить двухмембранный конструктив ТП давления на более простой в технологическом плане одномембранный для 4 диапазонов измеряемого давления;

- снизить себестоимость датчиков давления МИДА примерно на 4-6%;

<u>Реализация результатов работы.</u> Полученные научные и практические результаты были использованы в ЗАО «Микроэлектронные датчики и устройства» (ЗАО МИДАУС) г. Ульяновск при разработке ТП и датчиков давления МИДА. Разработанный полупроводниковый чувствительный элемент с оптимизированной топологией №МД-010 внедрен в серийное производство тензопреобразователей и датчиков давления в ЗАО МИДАУС с 2010 года.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты исследований были представлены и получили положительную оценку на международной научно-технической конференции «Датчики и Системы -2005» (г. Пенза, 2005 г.), на пятой Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (г. Ульяновск, 2006 г.), на Х Международной научно-технической конференции ежегодной «Энергоресурсосбережение. Диагностика - 2008» (г. Димитровград, 2008 г.), на Международном научно-техническом XIII семинаре «Механометрика» (Московская область, пос. Поведники, 2010 г.).

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1. В упругих элементах чашечного типа при нагружении давлением или силой деформации распространяются за пределы контура мембраны на основание УЭ и на жесткий центр, и чем толще мембрана, тем дальше они распространяются.
- 2. Для получения адекватных результатов численного моделирования при расчете профилей упругих деформаций недостаточно учитывать только сам УЭ, а необходимо учитывать конструкцию ТП в целом.
- 3. В двухслойных мембранах с ПЧЭ на основе КНС на распределение термических напряжений, возникающих после пайки ПЧЭ и определяющих температурные свойства ТП в целом, большой вклад вносит краевой эффект.
- 4. Размещение тензорезисторов на определенном расстоянии от края ПЧЭ позволяет оптимизировать температурные характеристики ТП.
- 5. Полученные экспериментальные результаты вместе с разработанной математической моделью позволили создать унифицированный ПЧЭ, обеспечивающий максимальную чувствительность и оптимальные метрологические характеристики для одно- и двухмембранных ТП на диапазоны измеряемых давлений от 10 кПа до 200 МПа.

6. Хотя экспериментальные исследования проводились на ТП давления на основе КНС, но полученные результаты в полной мере применимы для любых других ТП с мембранными УЭ чашечного типа.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня российских рецензируемых научных журналов по списку ВАК, 1 статья в межвузовском сборнике научных трудов, 5 материалов конференций и тезисов докладов.

<u>Личный вклад автора</u> заключается в выполнении теоретических и всех экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку теоретических моделей, методик экспериментальных исследований, макетных образцов тензопреобразователей и оснастки для испытаний, выбор необходимого оборудования и проведение исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

<u>Объем работы</u>. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, в которые вынесены химические составы рассматриваемых в работе сплавов, вывод расчетных формул для компонентов тензора деформации, а также акты внедрения результатов диссертационной работы. Основной текст диссертации состоит из 113 машинописных страниц, 58 рисунков и 8 таблиц. Список литературы включает 64 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и задачи научного исследования, определены направления ее решения, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ чувствительности ТП давления мембранного типа на основе структур КНС. Показано, что в наиболее распространенном исполнении тензорезистивной мостовой схемы ПЧЭ в смежных плечах находятся радиальные и тангенциальные TP, ориентированные по кристаллографическим направлениям <110> кремния и расположенные вблизи края мембраны. Для такой тензосхемы с одинаковыми начальными значениями сопротивлений радиальных R_r и тангенциальных R_t TP $(R_r|_{P=0} = R_t|_{P=0} = R - мост сбалансирован при отсутствии давления P) изменение выходного сигнала <math>U_{\rm вых}$ под действием давления при питании моста постоянным напряжением $U_{\rm пит}$ равно:

$$\Delta U_{\rm Bbix} = U_{\rm пит} (\Delta R_t - \Delta R_r) / (2R + \Delta R_t + \Delta R_r) \approx U_{\rm пит} (\Delta R_t - \Delta R_r) / 2R , \qquad (1)$$

где ΔR_t и ΔR_r – изменения сопротивлений соответствующих тензорезисторов под действием давления. Из (1) видно, что при фиксированном напряжении питания для получения максимального изменения выходного сигнала ТП необходимо, чтобы разность чувствительностей ТР, находящихся в смежных

плечах мостовой схемы, была максимальной. В работе также рассмотрена связь сопротивления изменения полупроводниковых TP относительного вызывающей это изменение деформацией. Из рассмотрения следует, что изменения сопротивления взаимно перпендикулярных ТР, расположенных в местах с одинаковым распределением деформаций, имеют противоположные величин изменений сопротивлений радиальных разность знаки, a И тангенциальных ТР по абсолютной величине составляет:

$$\left|\frac{\Delta R_t}{R_t} - \frac{\Delta R_r}{R_r}\right| \approx m_{44} |\varepsilon_t - \varepsilon_r| = m_{44} \Delta \varepsilon .$$
⁽²⁾

выражений (1) и (2) видно, получения Из ЧТО для максимальной чувствительности ТП необходимо, чтобы тензорезисторы мостовой схемы находились в зоне максимальной разности радиальной и тангенциальной измеряемым Такое деформаций, вызванных давлением. расположение тензорезисторов обеспечивает также минимальное значение нелинейности и вариации выходного сигнала ТП.

Анализ научно-технической литературы показал, что для расчета распределения деформаций в УЭ, а соответственно и зоны оптимального расположения ТР на ПЧЭ, на практике используют аналитические и численные методы. Аналитический метод расчета распределения деформаций в УЭ чашечного типа основан на классических уравнениях для круглой (или квадратной) мембраны, жестко защемленной по контуру и нагруженной либо давлением, либо сосредоточенной в центре силой. Численный метод расчета распределения деформаций в УЭ основан на сведении задачи теории упругости к одному или нескольким дифференциальным уравнениям в частных производных и последующем их решении численными методами. Принимая во внимание то, что ТП мембранного типа с точки зрения моделирования является сложной геометрической фигурой, для решения задачи по определению профилей деформаций в круглых мембранах реальных ТП целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ).

На рис. 1 представлены результаты численного и аналитического расчета тангенциальной распределения радиальной И составляющих тензора деформаций, возникающих при нагружении УЭ. Из рис. 1 видно, что численная модель с использованием метода конечных элементов дает результаты по распределению деформаций на поверхности УЭ ТП давления принципиально отличающиеся от полученных аналитическим путем. Представленные графики показывают, что чем больше диапазон измеряемых давлений (соответственно больше толщина мембраны УЭ), тем больше это расхождение. Для устранения неопределенности ланной И проверки адекватности рассмотренных диссертационной работе теоретических моделей В было проведено экспериментальное исследование распределения деформаций на поверхности УЭ ТП давления чашечного типа.

8



Рис. 1. Расчетные распределения деформаций на поверхности УЭ для тестового ТП с конструктивными параметрами: *a*) *h*/*r*₀=0.054 и *б*) *h*/*r*₀=0.638 пунктирные линии – данные расчета по аналитической модели сплошные линии – данные расчета по численной модели

Во второй главе представлены результаты экспериментального исследования распределения изменения сопротивления ТР и распределения деформаций по поверхности ПЧЭ для ТП давления с круглыми мембранами.

Исследование производилось с помощью специально разработанной тензометрической методики экспериментального определения распределения радиальных и тангенциальных составляющих деформаций на поверхности круглых мембранных УЭ. Суть методики заключается в следующем: на мембрану исследуемого УЭ напаивался полупроводниковый чувствительный элемент на основе КНС со специальной топологией, рис. 2, состоящей из последовательно соединенных малобазных радиальных и тангенциальных ТР, расположенных по диаметру мембраны.



Рис. 2. Полупроводниковый чувствительный элемент на основе структур КНС с размером 10×10 мм со специальной тестовой топологией

Экспериментально определялось сопротивления ТР тестовой структуры а также их изменение под действием давления при различных температурах. При этом общая погрешность косвенного измерения сопротивления тензорезисторов не превышала 0,1%.

В работе были исследованы одномембранные ТП с мембранным упругим элементом чашечного типа, конструктивные параметры мембраны которого изменялись в следующих пределах: толщина мембраны $h=0,3\div3,5$ мм; радиус мембраны $r_0=2,0\div3,9$ мм. На рис. 3 представлены типичные зависимости относительного изменения сопротивления радиальных и тангенциальных ТР от расстояния до центра мембраны r под действием подаваемого давления.

Из представленных на рис. З графиков видно, что в реальных ТП условие жесткого защемления, т.е. когда деформации сразу за границей мембраны (соответственно и изменение сопротивления ТР) обращаются в ноль, не выполняется.



Рис. 3. Экспериментальные (точки) и рассчитанные по аналитической модели (линии) распределения относительного изменения сопротивления радиальных (1) и тангенциальных (2) ТР по радиусу мембраны ТП с разными конструктивными параметрами (стрелкой указано расстояние r_0)

Видно также, что экстремум чувствительности ТР смещен относительно края мембраны. В наиболее распространенном исполнении тензорезистивной мостовой схемы в смежных плечах находятся радиальные и тангенциальные ТР, расположенные у края мембраны. Из (1) следует, что для ТП с такой тензосхемой наиболее информативным параметром с точки зрения проектирования ТП с максимальной чувствительностью является полуразность относительных изменений сопротивлений радиальных и тангенциальных ТР:

$$\delta = (\Delta R_t / R - \Delta R_r / R) / 2 . \tag{3}$$

Физический смысл величины δ – это относительная чувствительность ТП. На рис. 4 приведены результаты экспериментального определения распределения величины δ по поверхности ПЧЭ с различным отношением толщины h упругой мембраны к ее радиусу r_0 для одномембранных ТП. Как видно из рисунка, экстремум величины δ практически всегда смещен относительно края мембраны. Он находится вблизи края мембраны только при средних ее толщинах ($h/r_0 \sim 0.5$). При малых толщинах ($h/r_0 \leq 0.25$) максимум смещается внутрь мембраны, а при больших толщинах мембраны $(0,75 \le h/r_0 \le 1,2)$ – за ее границу и расплывается. Наконец, при достаточной толщине мембраны $(h/r_0 > 1,2)$ максимум исчезает. Известна [Черницын В.Н., 1989] эмпирическая величины смещения формула для Δr экстремума относительной чувствительности δ за границу мембраны r_0 :

$$\Delta r = h(h/k)^{4,5} , \qquad (4)$$

где *k* – постоянная величина, равная 1,6 мм.



Рис. 4. Распределение относительной чувствительности ТП по радиусу УЭ при разных значениях отношения толщины мембраны к ее радиусу

Результаты проведенных исследований показывают, что смещение Δr экстремума относительной чувствительности δ за границу мембраны не описывается этой формулой, в которой учитывается только толщина мембраны. Сравнение результатов экспериментальных измерений смещения Δr максимума величины δ при различных толщинах и радиусах мембраны ТП с графиком, полученным по формуле (4) показывает, рис. 5, что смещение экстремума δ зависит не только от толщины мембраны, но и от ее радиуса.





Полученные экспериментальные данные позволили провести проверку на адекватность теоретические модели, используемые при проектировании ТП давления с мембранными УЭ чашечного типа. Для этого экспериментальные зависимости относительного изменения сопротивления радиальных и тангенциальных ТР по формулам (5)-(6) пересчитывались в распределение радиальных ε_r и тангенциальных ε_t составляющих тензора деформаций.

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R_r / R_r + \Delta R_t / R_t}{2m_{11} + 2m_{12}(1 - 2v_k)} + \frac{\Delta R_r / R_r - \Delta R_t / R_t}{4m_{44}}$$
(5)

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_r / R_r + \Delta R_t / R_t}{2m_{11} + 2m_{12}(1 - 2v_k)} - \frac{\Delta R_r / R_r - \Delta R_t / R_t}{4m_{44}} \quad , \tag{6}$$

где v_k – коэффициент Пуассона кремния, m_{11} , m_{12} , m_{44} – коэффициенты эластосопротивления.

На рис. 6 на примере одномембранного ТП представлены результаты сравнения расчетных значений радиальных ε_r и тангенциальных ε_t составляющих деформаций с аналогичными экспериментальными данными. Как видно из графиков, уже начиная с нижних пределов измерения зависимости, рассчитываемые по аналитическим выражениям для деформаций в мембране, жестко закрепленной по контуру и нагруженной давлением, имеют сильное рассогласование с экспериментальными данными. Из графиков видно, что максимальные расхождения наблюдаются на краю мембраны r_0 и на основании чашки УЭ, причем, чем больше толщина мембраны h, тем больше расхождение.



Рис. 6. Распределение радиальных ε_r (rad) и тангенциальных ε_t (tg) составляющих деформаций по радиусу мембраны TП с разными параметрами.
Сплошная линия – численное моделирование (предоставлены Пироговым А.В.);
Пунктирная линия – расчет по аналитическим выражениям для деформаций в мембране, жестко закрепленной по контуру и нагруженной давлением;
Светлые и темные точки – результат экспериментального измерения

Это указывает на то, что в реальных ТП условие жесткого закрепления мембраны по контуру не действует. В отличие от классической аналитической модели расчетные распределения деформаций, полученные с помощью численной модели ТП, разработанной в ЗАО МИДАУС, достаточно хорошо согласуются с распределениями деформаций, полученными экспериментальным путем в диссертационной работе.

В третьей главе рассмотрены температурные характеристики мембранных ТП давления с ПЧЭ на основе КНС, представлены результаты измерения температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) ТР.

В ТП на основе КНС упругий элемент выполнен в виде чашечной мембраны из титанового сплава, на которую высокотемпературным припоем напаян ПЧЭ из структуры КНС. Поскольку соединение сапфирового элемента с титановым сплавом осуществляется при высокой температуре, то после температурных различия коэффициентов линейного охлаждения из-за расширения сапфира ($\alpha_{Al_2O_3} \approx 6 \cdot 10^{-6} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$) и титанового сплава ($\alpha_{Ti} \approx 9 \cdot 10^{-4} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$) в такой мембране возникают значительные термические деформации, которые вызывают изменение температурных зависимостей сопротивлений ТР и, температурной следовательно, появление аддитивной составляющей погрешности TΠ. В работе проведено исследование температурных зависимостей радиальных и тангенциальных ТР на поверхности сапфирового ПЧЭ, напаянного на УЭ чашечного типа из титанового сплава. Показано, что в температурном интервале -40..+180 °C температурные зависимости сопротивлений ТР R(T) хорошо аппроксимируются зависимостью:

$$R = R_0 e^{\alpha_R T}$$
⁽⁷⁾

где α_R – температурный коэффициент сопротивления ТР; R_0 – сопротивление ТР при нулевой температуре (T=0 °C). Подбор коэффициентов α_R и R_0 производился методом наименьших квадратов (МНК).

Типичные результаты измерения ТКС α_R ТР, определяемых из формулы (7) для одномембранных ТП с различными радиусами и толщинами мембран и одинаковой толщиной сапфира приведены на рис. 7. Как видно из рисунка, на всех образцах на краю ПЧЭ наблюдаются сильные расхождения ТКС радиальных α_{R_r} и тангенциальных α_{R_t} ТР. Это свидетельствует о наличии на краю ПЧЭ, напаянного на титановую мембрану, анизотропных деформаций. Если в мостовой тензосхеме, состоящей из радиальных и тангенциальных ТР, сопротивления смежных ТР по-разному изменяются с температурой, то, как следует из формулы (1), температурная зависимость начального выходного сигнала ТП (при давлении, равном нулю) с учетом (7) определяется разностью ТКС радиальных α_{R_r} и тангенциальных α_{R_t} ТР:

$$\frac{\partial U_0(T)}{\partial T} = U_{\text{пит}} \left(\frac{\partial R_t}{R_t \partial T} - \frac{\partial R_r}{R_r \partial T} \right) = U_{\text{пит}} \left(\alpha_{R_t} - \alpha_{R_r} \right).$$
(8)



Рис. 7. Распределение ТКС радиальных (1) и тангенциальных (2) ТР на поверхности УЭ одномембранных ТП с разными конструктивными параметрами (стрелкой указан радиус мембраны r_0)

Для одномембранных ТП на рис. 8 приведены экспериментальные зависимости разности ТКС радиальных и тангенциальных ТР $\Delta \alpha_R = (\alpha_{R_t} - \alpha_{R_r})$ от расстояния до центра упругого элемента ТП на свободном ПЧЭ и после пайки на мембрану ТП. Как видно из приведенных зависимостей, при изменении толщины упругой мембраны *h* в достаточно широких пределах зависимость $\Delta \alpha_R(r)$ практически не изменяется и только при достаточно больших значениях толщины мембраны разность ТКС начинает слабо увеличиваться.



Рис. 8. Зависимость разности ТКС радиальных и тангенциальных ТР от расстояния до центра ПЧЭ при разных значениях отношения h/r_0 на свободном ПЧЭ (\bigcirc) и после пайки на УЭ

Это согласуется и с опытом производства ТП и датчиков давления МИДА: температурные дрейфы начального выходного сигнала ТП практически не зависят от диапазона измерения в интервале значений диапазонов измерения одномембранных ТП от 0,6 до 25 МПа, хотя отношение толщины упругой мембраны к ее радиусу изменяется при этом на порядок (от 0,03 до 0,3).

Также были получены распределения ТКС радиальных α_{R_r} и тангенциальных α_{R_t} ТР на поверхности двухмембранных УЭ ТП давления. Из представленного рис. 9 видно, что распределение ТКС на двухмембранных УЭ по сравнению с одномембранными имеет некоторые особенности, расхождения ТКС радиальных α_{R_r} и тангенциальных α_{R_t} ТР наблюдаются не только на краю мембраны, но и на жестком центре.



Рис. 9. Типичное распределение ТКС радиальных и тангенциальных ТР на поверхности УЭ двухмембранных ТП

Четвертая глава посвящена вопросам оптимизации характеристик ТП давления на основе КНС, приводятся новые технические решения и рекомендации, позволяющие значительно улучшить метрологические характеристики ТП основе КНС, что подтверждается данными сравнительных испытаний.

С помощью экспериментальной методики, приведенной в главе 2, было исследовано распределение относительного изменения сопротивления ТР на стандартных одномембранных и двухмембранных ТП, выпускаемых ПГ МИДА. Оказалось, что для получения требуемого выходного сигнала ТП сильно перегружались. Полученные во второй главе экспериментальные результаты вместе с апробированной численной математической моделью, разработанной в ЗАО МИДАУС, позволили изменить конструкции УЭ ТП

таким образом, чтобы ТР унифицированного ПЧЭ всегда размещались в зоне разницы радиальной и тангенциальной максимальной составляющих деформаций, вызванных измеряемым давлением. Сравнительные испытания оптимизированных ТΠ показали (таблица серийных И 1), что У оптимизированных ТΠ при сохранении величины чувствительности нелинейность преобразования уменьшилась в 1,5-2 раза. Вариация выходного сигнала ТП на 40 МПа в среднем снизилась в 3 раза, на 60 МПа, и на 100 МПа – в 6 раз, на 160 МПа – в 7 раз.

Согласно экспериментальным данным по распределению ТКС по поверхности мембраны УЭ ТП, приведенным в главе 3, максимальная разность ТКС радиальных и тангенциальных ТР наблюдается на краю ПЧЭ и уменьшается при движении к центру. Такая тенденция справедлива практически для всех исследованных ТП, причем для одномембранных ТП вид распределения разности ТКС не зависит от конструктивных параметров ТП. С учетом (8) в работе был разработан унифицированный ПЧЭ с новой топологией, обеспечивающий максимальную чувствительность и уменьшенный температурный дрейф нулевого сигнала для одно- и двухмембранных ТП на диапазоны измеряемых давлений от 10 кПа до 200 МПа.

Р _{изм} ,	Тип	№ ТП	чувствительность,	нелинейность,	вариация,	гистерезис,	темп. дрейф
МПа	а мембран		мВ/5В	%	%	%	нуля, мВ/120°С
40	серийные	11340M026562	56,773	0,049	0,053	0,011	13,968
		11340M033596	54,218	0,044	0,063	0,002	12,038
		11340M036885	50,724	0,057	0,073	0,010	13,546
	модифиц.	11340M042100	63,075	0,036	0,018	0,004	9,145
		11340M036909	65,940	0,040	0,017	0,000	12,457
		11340M042058	65,678	0,036	0,019	0,003	11,827
60	серийные	11360M036895	74,337	0,071	0,046	0,003	13,106
		11360M040220	75,378	0,080	0,069	0,017	12,154
		11360M036969	81,456	0,043	0,045	0,006	18,370
	модифиц.	11340M036914	65,686	0,032	0,009	0,003	12,341
		11340M042104	68,422	0,033	0,008	0,000	13,052
		11340M042076	69,429	0,039	0,004	0,000	13,593
	серийные	113100095050	48,839	0,090	0,069	0,038	14,363
100		113100095051	49,798	0,060	0,103	0,070	12,978
		113100040595	51,582	0,053	0,044	0,006	15,622
	модифиц.	113100040596	80,785	0,061	0,012	0,007	13,523
		113100040623	77,942	0,068	0,010	0,004	12,942
		113100040602	79,203	0,050	0,012	0,003	14,438
160	серийные	113160027323	80,024	0,110	0,072	0,012	16,939
		113160027276	74,825	0,102	0,062	0,016	13,144
		113160027316	79,677	0,080	0,042	0,003	16,796
	модифиц.	113160092365	89,010	0,061	0,006	0,006	11,717
		113160007850	88,333	0,047	0,008	0,009	13,641
		113160007849	87,577	0,073	0,009	0,008	13,082

Таблица 1. Метрологические характеристики ТП с серийными и оптимизированными мембранами.



Рис. 10. Фотографии ПЧЭ, используемого в серийных ТП МИДА (*a*), и с оптимизированной топологией для уменьшения температурного дрейфа нулевого сигнала ТП (*б*)

Виды старого (МД-007) и нового ПЧЭ (МД-010) приведены на рис. 10. Из сравнения статистических данных для ТП с ПЧЭ МД-007 и МД-010 (рис. 11) можно сказать, что благодаря внедрению в производство датчиков ПЧЭ с топологией МД-010 удалось снизить температурный дрейф нулевых сигналов ТП в 2-3 раза.



Рис. 11. Величины температурных дрейфов нулевого выходного сигнала ТП в диапазоне температур -40..+80 °С для серийных ТП МИДА со старой (МД-007) и новой (МД-010) топологией ПЧЭ на разные диапазоны измерения.

В этой главе также приведены данные разработки унифицированных ПЧЭ с новой топологией для двухмембранных ТП, состоящей только из радиальных TP, расположенных на границе жесткого центра и на периферии мембраны. Данные сравнительных испытаний серийных и опытных образцов ТП показывают (см. таблицу 2), что использование ПЧЭ с топологией МД-009 (рис. 12) позволяет дополнительно снизить аддитивную погрешность двухмембранных ТП (за счет в два раза меньшей разности ТКС у используемых TP), без изменения остальных метрологических характеристик. Разработана конструкция балочного ТП с узким ПЧЭ с топологией МД-012 (рис. 12), которая уменьшает площадь ПЧЭ и соответственно снижает их стоимость, а также повышает чувствительность ТП с балочным УЭ в 1.5 раза по сравнению с приборами других конструкций, что позволяет снизить нижний предел измеряемых давлений.





Рис. 12. Фотографии ПЧЭ с радиально-радиальной топологией тензосхемы для ТП двухмембранного конструктива (*a*), и для ТП балочного конструктива (*б*).

Таблица 2. Метрологические характеристики ТП с серийными (МД-007) и модифицированными (МД-009 и МД-012) ПЧЭ радиально-радиальными ТР.

Р _{изм} ,			чувствительность,	нелинейность,	вариация,	гистерезис,	темп. дрейф	
кПа	1143	1149 99	Nº 111	мВ/5В	%	%	%	нуля, мВ/120°С
0,6	МД-007	мембрана	1130M6096605	56,880	0,027	0,012	0,006	7,811
			1130M6096613	54,510	0,018	0,012	0,007	6,960
			1130M6096651	52,069	0,033	0,011	0,007	9,023
			1130M6096722	53,433	0,021	0,016	0,010	6,442
	МД-009		1130M6096617	52,899	0,234	0,016	0,007	2,056
			1130M6096620	53,414	0,222	0,002	0,000	5,436
			1130M6096640	55,389	0,247	0,014	0,005	0,832
			1130M6096703	55,549	0,282	0,021	0,003	4,001
10	МД-007	мембрана	11310K053022	26,684	0,081	0,022	0,019	7,261
			11310K053019	27,085	0,041	0,015	0,011	6,437
			11310K052989	26,446	0,079	0,011	0,023	8,188
			11310K053047	25,526	0,069	0,031	0,027	5,582
			11310K053037	23,448	0,055	0,017	0,017	6,148
	MI 012	мембрана	11310K307277	23,860	0,082	0,014	0,009	2,325
			11310K259922	27,332	0,036	0,030	0,009	-1,577
			11310K279033	30,575	0,036	0,028	0,012	-1,276
			11310K279036	20,102	0,044	0,018	0,013	-2,728
			11310K279035	27,675	0,051	0,022	0,026	-2,788
	МД-012-	балка	11310K307277	33,681	0,085	0,018	0,002	-3,484
			11310K259922	39,930	0,089	0,033	0,003	-1,911
			11310K279033	45,983	0,029	0,035	0,044	-1,882
			11310K279036	31,533	0,043	0,024	0,003	-2,679
			11310K279035	40,806	0,052	0,014	0,005	-3,552

В заключении приведены основные результаты работы. В соответствии с поставленными целями и задачами в диссертационной работе были получены следующие новые научные и практические результаты:

- 1. Экспериментально определено распределение изменения сопротивления под действием давления радиальных и тангенциальных полупроводниковых тензорезисторов на мембранных упругих элементах чашечного типа одно- и двухмембранных тензопреобразователей давления с чувствительными элементами на основе структур «кремний на сапфире».
- 2. Показано. используемое аналитическое описание что широко поверхности мембранного распределения деформаций на упругого чашечного тензопреобразователях элемента типа в давления не особенно при больших соответствует действительности, значениях отношения толщины мембраны к ее диаметру. Хотя экспериментальные результаты получены на ТПс ПЧЭ на основе КНС, указанный вывод справедлив для любых ТП с упругими элементами чашечного типа.
- 3. Экспериментально подтверждена справедливость численной математической модели ТП давления, полученной методом конечных элементов. Показано, что для количественного согласия расчетных значений профилей изменения сопротивления ТР с экспериментом необходимо при расчете учитывать не только параметры мембранного упругого элемента, но и конструкцию ТП давления в целом.

- 4. На основе результатов исследований проведена оптимизация топологии чувствительного элемента на основе структур КНС и параметров мембранного упругого элемента, что позволило снизить нелинейность (в 1,2-1,6 раза), вариацию (в 3-7 раз), температурный дрейф нулевого сигнала (в 2,5-3 раза).
- 5. На основе результатов исследований предложен чувствительный элемент балочного типа с радиально-радиальными тензорезисторами для двухмембранных преобразователей давления, имеющий в 3,3 раза меньшую площадь, чем стандартный чувствительный элемент.
- 6. Разработан преобразователь давления балочного типа, имеющий повышенную чувствительность, что позволяет вдвое уменьшить нижний предел измеряемых давлений датчиков давления на основе КНС (до 1,6-2,5 кПа).
- 7. Разработанные оптимизированные конструкции ТП с размещением тензорезисторов в зоне максимальных деформаций мембраны а также чувствительный элемент с оптимизированной топологией внедрены в серийное производство тензопреобразователей и датчиков давления в Промышленной группе МИДА.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

- 1. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. 2008. №1. С. 6-11.
- 2. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. 2009. №8. С. 50-53.
- Козлов, А.И. Сравнительные характеристики однослойных и двуслойных тензопреобразователей давления на основе структур КНС / А.И. Козлов, А.А. Устинов, Ю.С. Нагорнов // Материалы электронной техники. – 2012. – №1. – С. 66-67.
- 4. Козлов, А.И. Экспериментальное определение распределения деформаций в круглой упругой мембране тензопреобразователя давления / А.И. Козлов, В.М. Стучебников // Приборы. 2014. №7. С. 41-44.

Публикации в других изданиях

- 5. Козлов, А.И. Оптимизация топологии тензорезисторных чувствительных элементов на основе структур КНС / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // «Датчики и системы 2005» : сборник докладов международной научно-технической конференции.–Пенза, 2005.–С. 245-247.
- 6. Козлов, А.И. Распределение деформаций на поверхности тензопреобразователей давления на основе структур КНС / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // «Датчики и системы 2005» : сборник

докладов международной научно-технической конференции. – Пенза, 2005. – С. 248-250.

- 7. Козлов, А.И. Распределение деформаций на поверхности тензопреобразователей давления на основе структур КНС / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» : материалы V Российской научно-технической конференции (20-21 апреля 2006 года). – Ульяновск, 2006. – Т. 1. – С. 105-108.
- Козлов, А.И. Повышение точности микроэлектронных преобразователей давления на основе структур КНС / А.И. Козлов, Д.Б. Мартынов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // «Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2008» : сб. науч. тр. Х Международной научно-практической конференции. – Димитровград, 2008. – С. 159-168.
- 9. Васьков, Ю.А. Цифровой метод коррекции температурной погрешности преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» / Г.А. Емельянов, А.И. Козлов // Радиоэлектронная техника : межвузовский сборник научных трудов : под ред. В.А. Сергеева. Ульяновск, УлГТУ, 2009. С. 72-79.
- 10.Бушев, Е.Е. Высокоточные преобразователи давления на основе структур КНС / А.И. Козлов, Д.Б. Мартынов, В.М. Стучебников // «Механометрика 2010» : тезисы докладов XIII Международного научно-технического семинара (20-23 апреля 2010 года). Москва, 2010. С. 78-82.

Козлов Александр Ипатьевич

Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления

Автореферат

Подписано в печать 26.11.2014. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 1,4 Тираж 100 экз. Заказ _____

ИПК «Венец», 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.