## МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

# Козлов Александр Ипатьевич

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕМБРАННЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент, Киселев Сергей Константинович

Научный консультант – доктор технических наук, профессор, Стучебников Владимир Михайлович

Ульяновск – 2014

## Содержание:

Список обозначений	4
Список сокращений	6
Введение	7

1.1.	Взаимосвязь	изменения	сопротивления	тензорезисторов	И
дефор	маций	••••••			24
1.2. A	налитический ра	асчет деформа	ций в УЭ мембран	ного типа	26
1.3. Ч	исленный расчет	г деформаций	в УЭ мембранного	типа	32
1.3.1.	Задание области	и моделирован	ия и описание свой	іств материалов	33
1.3.2.	Разбиение облас	ти моделиров	ания на конечные	элементы	43
1.3.3.	Алгебраизация ;	цифференциал	ьного уравнения		44
1.3.4.	Вывод результа	гов расчета, ви	ізуализация данны	x	49
Вывод	цы к главе 1				52

2.1. Методика эксперимента	53
2.2. Распределение изменения сопротивления ТР	56
2.2.1. Одномембранные преобразователи	56
2.2.2. Двухмембранные преобразователи	62
2.3. Сравнение экспериментально полученных профилей	деформаций с
расчетными данными	67
Выводы к главе 2	70

3.1. Распределение ТКС тензорезисторов	72
3.1.1. Распределение ТКС в одномембранных ТП	75
3.1.2. Распределение ТКС в двухмембранных ТП	81
Выводы к главе 3	82

## 

4.1.	Оптимизация	размеров	одномембранных	ТΠ	для	уменьшения
нели	нейности и вари	ации выход	ного сигнала	•••••		84
4.2.	Оптимизация то	опологии П	НЭ для уменьшения	темг	терату	рного дрейфа
нуле	вого сигнала ТП	- • • • • • • • • • • • • • • • • •				
4.3. I	Разработка ПЧЭ	с топологие	й из сонаправленны	x TP.		90
Вывс	оды к главе 4					98

Заключение100
Список использованной литературы102
Приложение №1. Марка и химический состав (%) деформируемых титановых
сплавов
Приложение №2. Связь радиальных и тангенциальных составляющих
тензора деформаций с относительными изменениями сопротивлений
тензорезисторов под действием давления110
Приложение №3. Акт о внедрении результатов диссертационной работы в
ЗАО МИДАУС112
Приложение №4. Акт о внедрении оптимизированных ПЧЭ на основ
структур КНС в ЗАО МИДАУС113

## Список обозначений:

- D внешний диаметр чашки упругого элемента
- D'-цилиндрическая жесткость
- Е модуль Юнга
- *F* сила, действующая на жесткий центр мембраны
- Р-измеряемое давление
- *Q*-поперечная сила
- R сопротивление ТР
- $R_0$  сопротивление ТР при нулевой температуре (T=0 °C)
- $R_r$  сопротивление радиального тензорезистора
- $R_t$  сопротивление тангенциального тензорезистора
- S<sub>ii</sub> компоненты матрицы упругой податливости
- $\Delta U_0$  температурный дрейф нулевого сигнала
- U<sub>пит</sub> напряжение питания мостовой тензосхемы
- *U*<sub>вых</sub> выходной сигнал мостовой тензосхемы
- *h*<sub>ПЧЭ</sub> толщина ПЧЭ
- *h* толщина металлической мембраны (без учета ПЧЭ)
- $h_{np}$  толщина слоя припоя
- *h*<sub>dm</sub> толщина нижней мембраны двухмембранного ТП
- *m*<sub>*i*λ</sub> коэффициенты эластосопротивления
- *r* текущий радиус
- *r*<sub>0</sub> радиус мембраны
- $r_{l}$  радиус жесткого центра мембраны, без учета  $r_{lFT}$
- *r*<sub>oFT</sub> радиус скругления мембрана-основание
- *r*<sub>1FT</sub> радиус скругления мембрана-жесткий центр
- *r*<sub>1FD</sub> радиус скругления нижняя мембрана-жесткий центр
- *r*<sub>2FD</sub> радиус скругления мембрана-обойма
- $r_{dm}$  радиус нижней мембраны двухмембранного ТП, без учета  $r_{2FD}$
- $r_{dhc}$  радиус жесткого центра нижней мембраны, без учета  $r_{IFD}$

- α температурный коэффициент линейного расширения
- $\alpha_R$  температурный коэффициент сопротивления ТР
- $\alpha_{Rr}$  температурный коэффициент сопротивления радиальных ТР
- $\alpha_{R_t}$  температурный коэффициент сопротивления тангенциальных ТР
- $\beta$  модуль сдвига
- $\delta-$ относительная чувствительность ТП
- $\delta_o$  относительная чувствительность ТП при расположении тензорезисторов на краю мембраны
- $\delta_{l}$  относительная чувствительность ТП при расположении тензорезисторов на жестком центре
- $\delta_r$  относительная чувствительность ТП при радиально-радиальной ориентации тензорезисторов
- $\delta_t$  относительная чувствительность ТП при тангенциально-тангенциальной ориентации тензорезисторов
- $\varepsilon_i$  компоненты тензора деформации
- *є<sub>r</sub>* радиальная составляющая тензора деформации
- *ε*<sub>t</sub> тангенциальная составляющая тензора деформации
- $\lambda$  постоянная Ламэ
- *v*-коэффициент Пуассона
- *v*<sub>k</sub>-коэффициент Пуассона кремния
- $\sigma_r$  радиальная составляющая тензора механических напряжений
- $\sigma_t$  тангенциальная составляющая тензора механических напряжений
- $\sigma_i$  интенсивность напряжений по фон Мизесу
- $\sigma_{\rm B}$  временная прочность металлов
- $\sigma_{02}$  предел текучести металлов

## Список сокращений:

- ККЭ кольцевой конечный элемент
- КНИ кремний на изоляторе
- КНС кремний на сапфире
- КЭ конечный элемент
- МКР метод конечных разностей
- МКЭ метод конечных элементов
- МНК метод наименьших квадратов
- ПК персональный компьютер
- ПЧЭ полупроводниковый чувствительный элемент
- СЛАУ система линейных алгебраических уравнений
- ТКЛР температурный коэффициент линейного расширения
- ТКС температурный коэффициент сопротивления
- П тензорезисторный преобразователь
- ТР тензорезистор
- УЭ упругий элемент

#### Введение

Интенсивное развитие современной промышленности неразрывно связано с усложнением технологических процессов производства, которые немыслимы без систем автоматического контроля и управления. Точность функционирования таких систем определяется, главным образом, первичными измерительными приборами. Одними из таких первичных измерительных приборов являются разнообразные датчики И преобразователи давления. Давление – один из важнейших параметров, контролируемых в технологических процессах практически всех отраслей нефтедобывающего экономики: предприятиях И перерабатывающего комплекса, современной энергетики, в том числе атомной, металлургии, пищевой промышленности, машиностроении, жилищно-коммунального хозяйства и других отраслей, а также в научных исследованиях, например, в геофизических. Во всех этих случаях измерение давления с более высокой точностью повышает достоверность получаемых результатов измерения. Потребность в приборах измерения давления предприятиями развивающейся промышленности постоянно растет [1] и одновременно требует развития их функциональных возможностей, а также повышения точности.

Согласно данным, приводимым в литературе, в большей части применяемых датчиков давления используются тензорезисторные преобразователи (ТП) давления [2-5]. Практически во всех ТП используются мембранные упругие элементы (УЭ) чашечного типа, воспринимающие давление, на которых тем или иным образом закреплены тензорезисторы (TP), изменяющие свое сопротивление под действием деформации мембраны. На Рис В.1 – В.4 показаны некоторые типы мембранных преобразователей давления.

Металлические упругие элементы (Рис В.1) обычно используются для преобразователей, работающих в жестких условиях эксплуатации (например, в ракетно-космической технике [6]). На полированную поверхность



a)





Рис В.1. *а*) – тензорезисторный датчик давления ДАВ 077 (НИИФИ) с металлическим УЭ и металлопленочными тензорезисторами [7];

*б*) – металлический мембранный УЭ чашечного типа с тонкопленочными металлическими тензорезисторами [8]

воспринимающая мембрана; 2 – измерительная мембрана; 3 – жесткий центр;
соединительный шток; 5 – опорное основание; 6 – тонкопленочная гетерогенная
структура; 7 – подслой диэлектрика; 8 – диэлектрический слой; 9 – резистивный слой;
подслой проводников; 11 – слой проводников и контактных площадок

металлической мембраны наносится тонкий слой диэлектрика, на котором, в свою очередь, формируется тензочувствительная (обычно мостовая) схема из тонкоплёночных или толстоплёночных тензорезисторов. Достоинством таких П является большая перегрузочная способность, определяемая высокими прочностными характеристиками металла мембраны. К недостаткам таких преобразователей относится невысокая чувствительность металлических ТР, определяемая основном изменением геометрических размеров при В деформации, также определённая сложность нанесения прочного а

изолирующего слоя и точного изготовления тензорезисторов фотолитографией на индивидуальных упругих элементах.

Достаточно широкое распространение получили ТП, в которых мембрана чашечного типа выполнена из керамики [9], а на её поверхность также нанесены металлические (в основном толстоплёночные) тензорезисторы (Рис В.2). Несомненными достоинствами таких ТП является простота изготовления мембраны и высокая химическая стойкость керамики. К недостаткам следует отнести, кроме невысокой чувствительности, сложность изготовления тонких мембран для измерения малых давлений и сравнительно невысокую перегрузочную способность.

В последние десятилетия широчайшее распространение получили ТП давления, в которых мембрана чашечного типа изготовлена из монокристаллического кремния, а тензорезисторы изготовлены диффузией



Рис В.2. *а*) - тензорезисторный датчик давления DMK 331 (BDSensors) с керамическим УЭ и металлопленочными ТР [10];

- *б*) керамический мембранный УЭ чашечного типа с толстопленочными металлическими тензорезисторами [10]
  - *в*) схематическое изображение керамического мембранного УЭ чашечного типа 1 – керамика; 2 – толстопленочные ТР со схемой термокомпенсации

или ионным легированием [11 – 13, 32] (Рис В.3). Анизотропное травление кремния позволяет получать мембраны с высокой точностью размеров и



Рис В.3. *а*) - Тензорезисторный датчик давления Series 23SY (Keller) с кремниевым УЭ и полупроводниковыми ТР, изолированными от подложки *p-n* переходом [14] *б*) - Тензорезисторный датчик давления DCT-1000 Series (Kulite) с кремниевым УЭ и полупроводниковыми ТР, выполненные по технологии КНИ (кремний на изоляторе) [15] *в*) - тензомодуль давления Series 10 (Keller) с кремниевым УЭ [14] *с*) - Схематическое изображение тензомодуля давления Series 10 (Keller) [14] *о*) - схематическое изображение кремниевого мембранного УЭ чашечного типа с полупроводниковыми ТР, выполненным по разным технологиям [12]

формы (правда, квадратной формы в отличие от металлических И керамических мембран), а хорошо отработанная планарная технология изготавливать мембранные элементы с хорошей позволяет массово воспроизводимостью. Несомненным достоинством ТП на основе кремниевых мембранных элементов является высокая чувствительность тензорезисторов. К недостаткам кремниевых планарных ТП следует отнести невысокую химическую стойкость кремния, сильную температурную зависимость параметров ТП и наличие изолирующего *p-n* перехода, ограничивающего рабочую температуру таких ТП величиной 120-150°С (последнее не касается кремниевых УЭ с технологией кремний на изоляторе (КНИ)). Перегрузочная способность кремниевых ТП также невелика (из-за хрупкости кремния), хотя это частично компенсируется высокой чувствительностью кремниевых тензорезисторов.

Заметное место среди ТП (особенно отечественного производства) занимают тензопреобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур «Кремний на сапфире» (КНС) [16-20] (Рис В.4*a*, В.4*б*). Структуры КНС [16, 21] представляют собой тонкий (от долей микрона до нескольких микрон) слой монокристаллического кремния, выращенный на подложке ИЗ монокристаллического сапфира. Полупроводниковые чувствительные элементы (ПЧЭ) изготавливаются стандартным методом фотолитографии на пластине КНС (обычно диаметром 76 мм), которая затем шлифуется до необходимой толщины (50-150 мкм) и разделяется на отдельные ПЧЭ методом скрайбирования. Затем ПЧЭ напаиваются жёстким припоем на мембрану чашечного типа, изготовленную из титанового сплава (Рис В.4*в*). Для измерения малых давлений используется двухмембранная конструкция (Рис B.42), В которой используется дополнительная мембрана, воспринимающая давление и соединённая с мембраной, на которую напаян ПЧЭ, металлическим штоком.

ТП с чувствительными элементами на основе КНС обладают целым рядом достоинств, фактически объединяя достоинства ТП с

11



Рис В.4. *а*) - Тензорезисторный датчик давления МИДА-15 (МИДАУС) с металлическим УЭ и полупроводниковыми ТР, выполненными по технологии КНС [20] *б*) - Тензорезисторный датчик давления GENSPEC GS4000 (ESI) с металлическим УЭ и полупроводниковыми ТР, выполненными по технологии КНС [18] *в*) – тензомодуль с металлическим УЭ и ПЧЭ на основе КНС. *г*) – схематическое изображение одномембранной и двухмембранной конструкции ТП с мембраннымУЭ чашечного типа.

1 – ПЧЭ; 2 – мембранныйУЭ чашечного типа; 3 – приемная мембрана.

мембранами способность). металлическими (высокая перегрузочная керамическими мембранами (абсолютная изоляция тензорезисторов от подложки) и кремниевых ТП (высокая чувствительность и использование планарной технологии при изготовлении). На основе таких ТП в СССР в 70-80-х годах были разработаны комплексы датчиков «Сапфир» и «Сапфир-22» [22-24]; последние стали основным средством измерения давления в отечественной промышленности. Впоследствии были разработаны И выпускаются серии датчиков давления МИДА-12 [25], МИДА-13 [26], «Метран-55» [27] и др. Такое широкое применение структур КНС в тензопреобразователях давления связано с тем, что в результате детального исследования свойств этих структур были выбраны слои кремния определённого уровня легирования и тензорезисторы определённой формы,

которые обеспечивали оптимальные метрологические характеристики ТП и датчиков в целом [28]. На основе структур КНС были разработаны ТП для измерения давления криогенных жидкостей [29] и высокотемпературных сред [30], а также было показано, что ТП давления с чувствительными элементами на основе КНС обладают высокой радиационной стойкостью [31].

Для всех рассмотренных ТП единым является принцип преобразования измеряемого давления в электрический сигнал. Измеряемое давление P или вызываемое им перемещение штока (в двухмембранных ТП) изгибает мембрану УЭ, вызывая на её поверхности деформацию є; эта деформация передаётся к ТР, жестко связанным с поверхностью мембраны; в результате изменяется сопротивление R тензорезисторов, и на выходе мостовой схемы появляется выходной сигнал  $U_{вых}$ , пропорциональный измеряемому давлению:

$$U_{\rm BMX} \sim \Delta R / R \sim \varepsilon \sim P$$

Важнейшей задачей при разработке ТП давления является определение такого расположения на поверхности мембраны и формы ТР, при которых изменение сопротивления  $\Delta R/R$  тензорезисторов (точнее разности изменений сопротивлений ТР в смежных плечах моста) максимально. Если оптимизировать таким образом топологию тензочувствительной схемы ТП, то соответственно минимизируются нелинейность и вариация ТП и увеличивается его выходной сигнал и перегрузочная способность.

Изучение научно-технической и патентной литературы, материалов конференций показало, что, к сожалению, несмотря на многолетнюю историю разработок и многомиллионного производства ТП, вопросам оптимального расположения тензорезисторов на поверхности мембран не было уделено достаточного внимания. Это вызвано тем, что при проектировании упругих элементов как в интегральных кремниевых ТП [32], так и в ТП с металлическими тензорезисторами или с ПЧЭ на основе КНС [33] всегда предполагалось, что распределение деформаций в мембране УЭ чашечного типа достаточно точно описывается классическими уравнениями для круглой (или квадратной) мембраны, жёстко защемлённой по контуру [34-36]. Согласно этим уравнениям тензорезисторы на ПЧЭ следует располагать у внешнего края мембраны (понимая под этим внутренний край чашки УЭ) со стороны центра УЭ (Рис В.5).

Правда, в конце 1980-х годов в НИИТеплоприборе была сделана попытка экспериментального определения реального распределения деформации (и, соответственно, чувствительности ТР) на УЭ чашечного типа с ПЧЭ на основе КНС [37]. Выяснилось, что деформации заходят за край мембраны на основание УЭ, так что центр тензорезисторов следует располагать с внешней стороны границы мембраны. Была предложена эмпирическая формула для сдвига центра ТР от границы мембраны в виде  $\Delta r = h(h/k)^{4,5}$ , где h – толщина мембраны, а k=1.6 мм – экспериментально



a)

б)

Рис В.5. Обозначение параметров УЭ без жесткого центра (*a*) и с жестким центром (*б*) 1- тензорезистор; 2- ПЧЭ; 3 – металлическая мембрана УЭ; 4 - основание УЭ;  $r_0$  – радиус мембраны

*r*<sub>1</sub>- радиус жесткого центра мембраны

*D* – внешний диаметр чашки упругого элемента

*h*<sub>ПЧЭ</sub> − толщина ПЧЭ

*h*- толщина металлической мембраны

определённая константа. Однако, развития эти работы не получили, а последующие исследования, проведённые нами и представленные в настоящей работе, показали, что эта формула в общем случае неверна.

Ha сегодняшний день существуют отдельные исследования. посвященные проектированию кремниевых ТП с мембранами чашечного типа. Для облегчения работы разработчиков строятся приближенные аналитические модели. В [38-39] приводятся аналитические решения для круглых и квадратных кремниевых мембран, позволяющие предсказать величину выходного сигнала ТП при разных значениях подаваемого давления для случая больших прогибов мембран. В работе [40] предложен алгоритм численного решения дифференциального уравнения круглой мембраны в области малых перемещений, основанный на уравнении изгиба балки. Граничные условия для решения задачи при этом, как и раньше, определяются жестким закреплением мембраны по контуру, поэтому результаты расчета, как показано в настоящей работе, оказываются далекими от истины. Однако, в большинстве случаев [41, 42, 56] при выборе оптимального места расположения ТР на УЭ до сих пор исходят из классической модели распределения деформаций на мембране, жестко защемленной по контуру, разработанной еще во второй половине прошлого столетия [33].

В последнее время делаются попытки боле точного моделирования деформированного состояния мембран УЭ. В 2007 году китайские исследователи также обратили внимание на необходимость более точного расчёта распределения деформаций по поверхности кремниевого интегрального УЭ [43]. Численный расчёт показал (Рис В.6), что даже в случае тонких мембран (10-50 мкм) напряжения проникают далеко за пределы границы мембраны в сторону её основания, поэтому центр тензорезисторов следует располагать не с внутренней стороны границы мембраны, а на её краю. На опытном образце с толщиной кремниевой мембраны 30 мкм такое расположение дало увеличение чувствительности ТП



Рис В.6. Сравнение распределений разности (нормированной) расчетных значений напряжений ( $\sigma_r - \sigma_t$ ) для разных толщин мембран (размером 470 X 470 мкм) при давлении 1 МПа. [43]

на 10%. В [44] (2009 г.) представлены результаты математического моделирования термоупругого напряженно-деформированного состояния и прочности датчика давления, функционирующего в условиях механических и тепловых ударов. В работе экспериментальной проверки адекватности модели не проводилось, а за критерий адекватности был выбран степень приближенности результатов численного расчета к результатам аналитического расчета, проводимого по [36]. В работе [45], опубликованной 2013 году, приведена модель мембраны чувствительного В элемента разработанного гибридных тензодатчика, исследований В рамках чувствительных датчиков давления (объемного элементов кремния, кремниевой мембраны). Результаты численного моделирования методом конечных элементов приведены на Рис **B**.7 В виде размещения тензорезисторов на плоской мембране в местах наибольшей деформации. Как видно из рисунка, ТР также целиком расположены с внутренней стороны границы мембраны, что согласно результатам нашей работы не является



Рис В.7. Расположение тензорезисторов на плоской мембране чашечного типа [45].

оптимальным и также не согласуется с данными, приведенными в [43]. Следует заметить, что работа [45] имеет исключительно теоретический характер, экспериментальной проверки адекватности разработанных моделей в ней не проводилось, а также то, что она была сделана после публикаций [43, 60], в которых была показана неправильность такого расположения ТР на упругом элементе.

Кроме того, такие важные параметры ТП, как температурные коэффициенты сопротивления (ТКС) ТР, до сих пор были вообще не исследованы. Попытки исследования деформаций термического происхождения на поверхности мембраны ТП давления были предприняты в работе [46]. В ней предложено и экспериментально проверено аналитическое выражение, описывающее распределение термических деформаций на поверхности сапфировой подложки, напаянной на титановое основание, размеры которого намного больше размеров подложки. Также рассмотрено влияние этих деформаций на аддитивную составляющую температурной

погрешности ТП и изменение разбаланса тензомоста, вызванного пайкой ПЧЭ к металлу. Однако эксперимент ставился на ограниченном количестве опытных образцов и поэтому результаты подлежат более глубокому анализу.

Таким образом. систематических исследований реального распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента чашечного типа как экспериментальных, так и расчётных до начала 2000-х годов не проводилось. Отсутствие такого рода информации 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 исследования восполняет пробел в данной области знаний, что и определяет ее актуальность. В ЗАО МИДАУС в рамках научно-исследовательских работ по оптимизации ТП на основе КНС была поставлена задача разработки адекватной математической TΠ. описывающей реальное распределение относительного модели изменения сопротивления ТР по поверхности ПЧЭ на основе КНС в ТП одно- и двухмембранного типов. Аналитического решения этих задач для мембран чашечного типа не существует; решение возможно получить только численными методами. На сегодняшний день численное решение методом конечных элементов (МКЭ) можно получить с использованием специальных модулей для проведения инженерных расчетов, входящих в состав систем автоматизированного проектирования (САПР), таких как Компас-3D, AutoCAD, SolidWorks и др., либо с использованием специальных САЕсистем, таких как ANSYS, ABAQUS, MSC. Nastran и др., предназначенных для решения различных задач механики деформируемого твердого тела. Однако программные продукты указанные лишь предоставляют пользователю инструмент конечно-элементного анализа, а точность решения задач и построения адекватных моделей во многом зависит от исходной модели, которая обязательно должна проверяться экспериментально для проверки результатов расчетов, и при необходимости внесения коррекции в

расчетные модели. В ходе проведенной совместной исследовательской работы сотрудником ЗАО МИДАУС Пироговым А.В. была разработана математическая модель ТП. Отладка модели и проверка адекватности проведением подробных экспериментальных исследований распределения относительного изменения сопротивлений ТР и деформаций в мембранном УЭ чашечного типа, а также разработка оптимизированного ТП составило цель настоящей диссертационной работы.

Достижение поставленной цели обеспечивалось решением следующих <u>задач</u>:

- Изучение различных теоретических моделей упругих элементов, применяемых в описании функционирования ТП с мембранами чашечного типа.
- Выявление отличий результатов расчетов характеристик упругих элементов реальных ТП с распределенными параметрами методом конечных элементов от аналитических расчетов моделей тонких пластин и оболочек, жестко закрепленных по периферии и нагруженных давлением, или сосредоточенной силой.
- Проведение экспериментального исследования распределения изменения сопротивления и ТКС тензорезисторов на поверхности ПЧЭ для различных конструктивов упругих элементов ТП на основе структур КНС.
- Получение профилей деформаций механического происхождения на поверхности ПЧЭ для различных конструктивов упругих элементов ТП.
- Проверка адекватности математической модели сравнением результатов расчета профилей деформаций в УЭ с полученными экспериментальными данными.
- Разработка на основе полученных данных оптимизированных ТП на основе КНС, исследование их метрологических свойств.

На защиту выносятся следующие положения:

- 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.
- Для получения адекватных результатов численного моделирования при расчете профилей упругих деформаций недостаточно рассматривать только сам УЭ, а необходимо учитывать весь ТП в целом.
- 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.
- Размещение тензорезисторов на определенном расстоянии от края ПЧЭ позволяет оптимизировать температурные характеристики ТП.
- 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.
- 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.

<u>Научная новизна диссертационной работы</u> характеризуется следующими основными положениями:

 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.

- Показано, что деформированное состояние УЭ чашечного типа не описывается аналитическими выражениями, справедливыми для круглых мембран, жестко защемленных по контуру.
- Предложено конструктивное решение оптимизации ТП, позволяющее значительно повысить их метрологические характеристики.
- Разработаны новые типы унифицированных ПЧЭ, обеспечивающих уменьшение температурной погрешности нулевого сигнала ТП и снижающих себестоимость изготовления ТП.

Практическая значимость работы заключается:

- В теоретическом и экспериментальном подтверждении, что широко используемое аналитическое описание распределения деформаций на поверхности мембранного тензопреобразователя давления не соответствует действительности, что деформации распространяются далеко в основание УЭ за границу мембраны, особенно при больших значениях отношения толщины мембраны к её диаметру.
- В оптимизации конструкций УЭ тензопреобразователей, благодаря чему удалось снизить нелинейность (в 1,2-1,6 раза) и вариацию (в 3-7 раз) выходного сигнала серийных ТП давления МИДА.
- В разработке полупроводникового чувствительного элемента на основе структур КНС №МД-010, использование которого позволило снизить температурный дрейф нулевого сигнала серийных ТП давления МИДА (в 2,5-3 раза).
- В разработке полупроводникового чувствительного элемента 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 ТРПД на более простой в технологическом плане одномембранный для 4 диапазонов измеряемого давления;

- снизить себестоимость датчиков давления МИДА примерно в 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 внедрён 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" (Пенза, 2005 г.), на пятой конференции "Энергосбережение российской научно-технической В городском хозяйстве, энергетике, промышленности" (Ульяновск, 2006 г.), на Х международной научно-технической конференции ежегодной "Энергоресурсосбережение. Диагностика - 2008" (г. Димитровград, 2008 г.), на XIII международном научно-техническом семинаре "Механометрика" (Московская область, пос. Поведники, 2010 г.).

<u>Публикации.</u> 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 значительного объема 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. Глава 1. Анализ чувствительности тензорезисторных преобразователей давления мембранного типа.

## 1.1. Взаимосвязь изменения сопротивления тензорезисторов и деформаций.

Тензорезисторные преобразователи лавления основе на тензочувствительных элементов, изготовленных из гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире», обладают рядом преимуществ по сравнению с другими микроэлектронными тензорезисторными преобразователями [47]. В таких ТП чувствительный элемент жестко соединен с титановой упругой мембраной, выполненной заодно с кольцевым основанием. Упругая мембрана воспринимает либо непосредственно давление измеряемой среды, либо усилие от приемной мембраны, соединенной с упругой мембраной штоком (Рис В.4г). Такая конструкция позволяет выпускать ТП на различные пределы измерения (в ПГ МИДА – от 4 кПа до 250 МПа [26]), используя один и тот же плоский чувствительный элемент из КНС и изменяя лишь геометрию упругой и приемной мембран.

Широкий диапазон измеряемых давлений определяет изменение геометрических параметров упругой и приемной мембран также в широких пределах. Вместе с тем, эти размеры должны быть такими, чтобы обеспечить ТΠ наилучшие метрологические характеристики (максимум чувствительности, минимум основной и дополнительной погрешностей) при одной и той же топологии тензочувствительной схемы. 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<sub>r</sub> и тангенциальных  $R_t$  TP ( $R_r|_{P=0} = R_t|_{P=0} = R$  – мост сбалансирован при отсутствии давления P) изменение выходного сигнала  $U_{\rm вых}$  под действием давления при питании моста постоянным напряжением  $U_{\rm пит}$  равно:

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

где  $\Delta R_t$  и  $\Delta R_r$  – 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, т.е.:

$$|\Delta R_t / R - \Delta R_r / R| = max \tag{2}$$

В общем виде относительное изменение сопротивлений полупроводниковых ТР, вызванное деформацией, можно записать в виде:

$$\frac{\Delta R_i}{R_0} = m_{i\lambda} \varepsilon_\lambda \qquad (i = 1, 2, \qquad \lambda = 1, 2, \dots 6), \tag{3}$$

где  $m_{i\lambda}$  – коэффициенты эластосопротивления, а  $\varepsilon_{\lambda}$  – компоненты тензора деформации. Учитывая определенный вид матрицы коэффициентов эластосопротивления [48], для кремниевых тензорезисторов, расположенных в плоскости (001) и ориентированных вдоль кристаллографических направлений <110>, получаем выражения для относительного изменения сопротивления радиальных и тангенциальных ТР, расположенных на круглой мембране продольно (*r*) и перпендикулярно (*t*) к радиусу [28]:

$$\frac{\Delta R_r}{R_r} = (m_{11} + m_{12} + 2m_{44})\frac{\varepsilon_r}{2} + (m_{11} + m_{12} - 2m_{44})\frac{\varepsilon_t}{2} - m_{12}v_k(\varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (4)$$

$$\frac{\Delta R_t}{R_t} = (m_{11} + m_{12} - 2m_{44})\frac{\varepsilon_r}{2} + (m_{11} + m_{12} + 2m_{44})\frac{\varepsilon_t}{2} - m_{12}v_k(\varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (5)$$

где *v<sub>k</sub>*- коэффициент Пуассона кремния.

Из выражений (4-5) следует, что изменения сопротивления взаимно перпендикулярных TP, расположенных в местах с одинаковым распределением деформаций, имеют противоположные знаки (поскольку  $m_{44} \gg m_{11}, m_{12}$  [28]), а разность величин изменений сопротивлений радиальных и тангенциальных TP по абсолютной величине составляет:

$$\left|\frac{\Delta R_t}{R_t} - \frac{\Delta R_r}{R_r}\right| \approx m_{44} |\varepsilon_t - \varepsilon_r| = m_{44} \Delta \varepsilon \tag{6}$$

Из выражений (2) и (6) видно, что для получения максимальной чувствительности ТП необходимо, чтобы тензорезисторы мостовой схемы находились в зоне максимальной разности радиальной и тангенциальной деформаций, вызванных измеряемым давлением. Такое расположение тензорезисторов обеспечивает также минимальное значение нелинейности и вариации выходного сигнала ТП.

Для расчета распределения деформаций в УЭ, а соответственно и зоны оптимального расположения ТР на ПЧЭ, на практике используют аналитические и численные методы. Рассмотрим подробнее каждый из них

### 1.2. Аналитический расчет деформаций в УЭ мембранного типа.

Определим деформации в круглой мембране радиусом  $r_0$  и толщиной h. При аналитическом расчете деформаций в круглых мембранах исходят из классической линейной теории изгиба круглых пластин, например [34-36]. На основании уравнений равновесия и совместимости деформаций, а также уравнений закона Гука для двухосного напряженного состояния может быть получено дифференциальное уравнение для круглой пластинки в области малых перемещений [34]:

$$\frac{d^2 \mathcal{G}}{dr^2} + \frac{d \mathcal{G}}{dr} - \frac{\mathcal{G}}{r} = -\frac{Q}{D'}, \qquad (7)$$

где  $\mathcal{G}$  – угол поворота нормали к срединной поверхности, Q – поперечная сила (см. Рис 1.1).



Рис 1.1. Усилия в пластинке. *а)* – пластинка под давлением *б)* – центральная часть пластинки

Величина *D'* называется цилиндрической жесткостью пластины и определяется как [34]:

$$D' = \frac{Eh^3}{12(1-v^2)},$$

где *Е* – модуль Юнга, v – коэффициент Пуассона. Из уравнения (7) получаем:

$$\frac{d}{dr}\left[\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(\Im r)\right] = -\frac{Q}{D'} \tag{8}$$

после двукратного интегрирования уравнения (8) получим общее решение уравнения (7):

$$\vartheta = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{D'r} \int \left[ \int Q dr \right] dr, \tag{9}$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий в каждом конкретном случае. Поперечная сила *Q*может быть найдена из условия равновесия центральной части пластины, выделяемой цилиндрическим сечением с радиусом *r*.

Для мембраны, равномерно нагруженной давлением *P* условие равновесия центральной части пластины дает выражение для поперечной силы:

$$Q \cdot 2\pi r = P \pi r^2 \qquad \Rightarrow \qquad Q = \frac{Pr}{2}$$

Подставим полученное значение поперечной силы для нашего случая в уравнение (9) и дважды проинтегрируем:

$$\mathcal{G} = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{P r^3}{16D'} \tag{10}$$

Найдем константы  $C_1$  и  $C_2$  из граничных условий. В случае жесткого защемления пластинки по контуру в центре пластинки (r = 0) и у края закрепления ( $r = r_0$ ) угол поворота  $\mathcal{G} = 0$ , отсюда  $C_2 = 0$  и  $C_1 = Pr_0^2/16D'$ . Подставляя полученные значения  $C_1$  и  $C_2$  в (10), получим:

$$\mathcal{G} = \frac{Pr}{16D'} (r_0^2 - r^2) \tag{11}$$

Деформации пластины (радиальная и тангенциальная составляющие) и угол поворота *9*(*r*) связаны между собой соотношениями [34]:

$$\varepsilon_r = \frac{h}{2} \frac{d\mathcal{P}}{dr} \tag{12}$$

$$\varepsilon_t = \frac{h}{2} \frac{g}{r} \tag{13}$$

Подставляя в (12) и (13) выражение (11), получаем аналитические выражения для распределения деформаций в мембране, жестко закрепленной по контуру и нагруженной давлением:

$$\varepsilon_r = \frac{h}{2} \frac{P}{16D'} (r_0^2 - 3r^2) \tag{14}$$

$$\varepsilon_t = \frac{h}{2} \frac{P}{16D'} (r_0^2 - r^2) \tag{15}$$

## На Рис 1.2 представлено распределение разности радиальной и



Рис 1.2. Разность радиальной и тангенциальной деформаций на поверхности круглой пластины, жестко закрепленной по контуру и нагруженной давлением.

тангенциальной составляющих деформаций В круглой мембране, рассчитанное по (14) и (15). Из рисунка видно, что в ТП с круглой мембраной, нагружаемой давлением, для выполнения условия (2), с учетом (6), тензорезисторы необходимо располагать на расстоянии го от центра, т.е. на краю закрепления мембраны с внутренней стороны от линии закрепления. Аналогичным образом получаем аналитические зависимости радиальной и тангенциальной составляющих деформаций для случая мембраны, нагруженной в центре силой. Из [34-36] для сплошной пластины радиусом  $r_0$ и толщиной h, защемленной по контуру и нагруженной в центре силой F, распределенной по кругу радиусом  $r_1$  (Рис 1.3) можно записать функцию угла поворота  $\mathcal{G}(r)$  в следующем виде

$$\mathcal{G}(r) = \frac{F}{4\pi D'} \left[ r \frac{k^2}{k^2 - 1} \ln k + \frac{1}{r} \frac{r_0^2}{1 - k^2} \ln k - r \left( \ln \frac{r}{r_1} \right) \right],\tag{16}$$

где через *k* обозначено отношение радиуса мембраны к радиусу жесткого центра:  $k = r_0/r_1$ . Учитывая, что деформации пластинки и функция угла поворота  $\mathcal{G}(r)$  связаны между собой соотношениями (12) и (13), получаем



Рис 1.3. Усилия в круглой пластине, жестко закрепленной по контуру и нагруженной в центре силой.

расчетные формулы для радиальной и тангенциальной составляющих деформаций в круглой плоской мембране, жестко закрепленной по контуру и нагруженной в центре силой:

$$\varepsilon_r = \frac{h}{2} \frac{F}{4\pi D'} \left[ \frac{\ln k}{k^2 - 1} \left( k^2 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \ln \frac{r}{r_1} - 1 \right]$$
(17)

$$\varepsilon_t = \frac{h}{2} \frac{F}{4\pi D'} \left[ \frac{\ln k}{k^2 - 1} \left( k^2 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \ln \frac{r}{r_1} \right]$$
(18)

На Рис 1.4 представлено распределение разности радиальной и тангенциальной составляющих деформаций в круглой мембране, рассчитанное по (17) и (18). Из представленного рисунка видно, что в ТП с круглой мембраной, нагружаемой силой, выполнение условия (2) и (6) можно добиться размещением тензорезисторов мостовой схемы как на расстоянии  $r_0$ , так и на расстоянии  $r_1$ , от центра, т.е. как у края закрепления мембраны, так и у края жесткого центра со стороны тонкой части мембраны.



Рис 1.4. Разность радиальных и тангенциальных деформаций на поверхности круглой пластины, жестко закрепленной по периферии и нагруженной в центре силой.

Вместе с тем, очевидно, что в мембранном УЭ чашечного типа деформации не могут обращаться в ноль при пересечении границ жёсткого центра и внешнего края мембраны, так что аналитические формулы, полученные из условия жёсткого защемления, не могут адекватно описывать распределение деформаций на реальном упругом элементе. Для решения реальной задачи распределения деформаций приходится прибегать к численному расчёту деформаций.

## 1.3. Численный расчет деформаций в УЭ мембранного типа.

Формально задачи теории упругости можно свести к одному или нескольким дифференциальным уравнениям в частных производных. Как правило, для реальных инженерных задач их аналитические решения не найдены. Точные решения получены только для ограниченного набора простых геометрических тел таких, как балка, стержень, плита и т.п. при также ограниченном наборе начальных и граничных условий. Однако возможно приближенное решение этих задач численными методами.

Существует два классических метода решения дифференциальных уравнений в численном виде: метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ). Не вдаваясь в подробный анализ достоинств и недостатков каждого метода, следует отметить, что метод конечных разностей хорошо зарекомендовал себя при моделировании прямоугольных областей и более прост в использовании. Если область моделирования не является прямоугольником (в двумерном случае) или параллелепипедом (в трехмерном), то целесообразно использовать метод конечных элементов. 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 МКЭ.

Реализацию поставленной задачи можно условно разбить на несколько этапов. Первый этап – задание области моделирования, описывающей геометрию ТП с заданной детализаций, и описание свойств материалов в соответствии с поставленной физической задачей. Второй этап – пространственное разбиение области моделирования на элементарные ячейки (дискретизация). От правильности проведения дискретизации во точность решения. При проведении многом зависит дискретизации придерживаются правила: большие градиенты – мелкая сетка, т.е. сетку следует измельчать в областях, в которых предположительно будут большие градиенты механических напряжений. *Третий этап* – алгебраизация дифференциального уравнения. Дифференциальное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). На этом этапе нужно ввести данные, необходимые для расчета. К ним относятся упругие константы моделируемого тела и граничные условия. Четвертый этап – численное решение СЛАУ. На этом этапе вмешательство оператора минимально и сводится только к запуску процесса решения. Пятый этап – вывод результатов расчета и представление их в удобной форме. На практике решение сложной пространственной задачи теории упругости стараются свести к решению осесимметричной задачи. Это позволяет на несколько порядков сократить время расчетов и снизить требование к аппаратным ресурсам. Остановимся кратко на описании каждого этапа моделирования.

#### 1.3.1. Задание области моделирования и описание свойств материалов.

Рассмотрим области моделирования ТП, которые используются в данной работе: двухмембранные тензопреобразователи (Рис 1.5*a*) и одномембранные ТП (Рис 1.5*б*). Наличие круговой симметрии, позволяет, без значительного ущерба для точности вычислений, ограничить область моделирования полуплоскостью сечения по радиусу. В этом случае, вместо трехмерной модели, рассчитывается двумерная модель с кольцевыми

33

(ККЭ). Использование двумерной конечными элементами модели, применительно к ТП, допустимо, если считать механические свойства ПЧЭ изотропными и его форму принять за диск. В представленных в работе двумерных расчетах ПЧЭ мембранных ТП принят цилиндром радиусом 5 мм и толщиной  $h_{\Pi Y \Im}$ , а в трехмерных – параллелепипедом с основанием 10x10 мм. Эти допущения, как будет показано ниже, не вносят существенных изменений В распределение деформаций областях размещения В тензорезисторов И результаты решения хорошо согласуются С экспериментальными данными. В зависимости от измеряемого давления, область значимой деформации либо локализуется в гибкой части мембран, либо распространяется в УЭ за границу гибкой части мембраны. Поэтому для ТП высокого давления в область моделирования необходимо включать не



Рис 1.5. Области моделирования ТП. *а*) двухмембранные ТП 10-600 кПа *б*) одномембранные ТП, 1-200 МПа.

только упругий элемент, но и детали, обеспечивающие соединение УЭ с объемом, в котором измеряется давление. Например, на Рис 1.56 в область моделирования включены сварочный шов и аналог штуцера. Необходимость дополнения области моделирования элементами крепления, определяется анализом поля напряжений при пробных расчетах: если дополнение областью приводит к значимому изменению поля в интересующей области, то оно необходимо.

Для задания, размеров мембран, явно значимых для расчета распределения деформаций в области размещения тензорезисторов ПЧЭ, введем следующие обозначения размеров (см. Рис 1.5):

 $h_{np}$  - толщина слоя припоя;

 $r_o$  - радиус мембраны, без учета  $r_{oFT}$ 

*r*<sub>oFT</sub> - радиус скругления мембрана-основание.

 $r_1$  - радиус штока, без учета  $r_{1FT}$ 

 $r_{1FT}$  - радиус скругления мембрана-шток;

*h*<sub>dm</sub> - толщина нижней мембраны

 $r_{dm}$  - радиус нижней мембраны, без учета  $r_{2FD}$ 

*r*<sub>2FD</sub> - радиус скругления мембрана-обойма;

 $r_{dhc}$  - радиус жесткого центра нижней мембраны, без учета  $r_{IFD}$ 

 $r_{1FD}$  - радиуса скругления нижняя мембрана-центр;

Области моделирования состоят ИЗ разнородных материалов. Металлические части из-за технологических ограничений могут быть изготовлены только из титановых сплавов. Материалом ПЧЭ является лейкосапфир, который соединяется с измерительной мембраной с помощью пайки. При моделировании необходимо знать физические характеристики материалов, используемых для изготовления ТП. Для статического анализа деформаций необходимо знать значения модулей упругости Ε, коэффициентов Пуассона зависимости температуры. v И ИХ OT Дополнительно для оценки прочностных характеристик ТП, необходимо иметь данные о временной прочности  $\sigma_{\rm B}$  и пределе текучести  $\sigma_{02}$  металлов.

Для оценки чувствительности ТМ также должны быть известны свойства эпитаксиально выращенного слоя кремния.

#### - Свойства титановых сплавов

Из всего многообразия титановых сплавов, выпускаемых промышленностью, для изготовления упругих элементов ТП обычно используются два сплава ВТ-6 и ВТ-9, химический состав которых приведен в приложении №1. Эти сплавы достаточно широко используются в машиностроении и обладают хорошими прочностными и удовлетворительными упругими свойствами. Сплав ВТ-6 (зарубежный аналог Ti-6Al-4V) используется для изготовления общепромышленных ТП, работающих в климатическом интервале температур, а ВТ-9 (зарубежных аналогов не найдено) пригоден для изготовления ТП высокотемпературных сред. На Рис 1.6–1.8 приведены характеристики этих



Рис. 1.6. Температурная зависимость предела прочности  $\sigma_{\rm B}$  и предела текучести  $\sigma_{02}$  для титановых сплавов ВТ6 и ВТ9.


Рис. 1.7. Зависимость коэффициента линейного расширения титановых сплавов ВТ6 и ВТ9 от температуры и режима термообработки.



Рис. 1.8 Температурная зависимость модуля упругости сплавов ВТ6 и ВТ9 от температуры.

сплавов [49, 50]. Для примера выберем в качестве материала для металлических частей сплав ВТ-9 [49]. Как видно из приведенных литературных данных (Рис 1.8), значения модуля упругости сплавов могут иметь разброс до 15-20%. Динамический модуль упругости определяется по скорости распространения продольных звуковых волн в материале, а статический – при растяжении образцов на разрывных машинах. Заметная разница для статического и динамического значений модуля упругости указывает на возможное возникновение погрешности при измерении быстропеременных давлений.

Аппроксимируем температурную зависимость модуля упругости сплава ВТ-9 линейной функцией E = 120.8 - 0.025 T в диапазоне температур 20÷400 °C. Аппроксимируем температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) по табулированным данным таблицы 1.1. из [49] линейной зависимостью  $\alpha = 7.77 + 0,00259 T$  в диапазоне температур 20÷400 °C. Коэффициент Пуассона ВТ-9 примем равным v = 0.35 [49].

T, °C	$\alpha(T)10^{-6}, 1/K$ (BT9)		
20	8.50		
100	8.76		
200	9.01		
300	9.27		
400	9.51		

Таблица 1.1. Температурная зависимость коэффициента линейного расширения сплава ВТ-9 [49]

# - Свойства лейкосапфира

По своим свойствам лейкосапфир является сильно анизотропным материалом. Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, в зависимости от ориентации в кристалле, можно найти по данным [51-53], где приведены температурные зависимости элементов матрицы упругой податливости  $S_{ij}$ . В работе [28] вычислены значения *E* и *v* при комнатной температуре для различных углов поворота относительно проекции оси *C* 

сапфира на плоскость (0112), используемую в структурах КНС (см. таблицу 1.2.).

Таблица 1.2. Модуль упругости и коэффициент Пуассона лейкосапфира при комнатной температуре

<i>ф</i> , град	Плоскость $(0\overline{1}12)$		
	<i>Е</i> , ГПа	ν	
0	370	0,256	
45 (135)	423	0,227	
90	425	0,293	

В подавляющем большинстве практических случаев на фоне разброса характеристик металлов и технологических погрешностей, влиянием анизотропии лейкосапфира можно пренебречь. Для расчетов примем значения *E* и *v* не зависящими от температуры константами: E = 400 ГПа, v=0.27.

Температурный коэффициент линейного расширения лейкосапфира также является анизотропным и различен по разным направлениям относительно оси *C* симметрии кристалла. В [28, 34] приведены табличные и графические зависимости (см. Рис 1.9) ТКЛР от температуры. При расчетах без учета анизотропии будем пользоваться усредненными для параллельного и перпендикулярного направлений значениями ТКЛР (таблица 1.3. из [28]).

T, °C	α, 10 <sup>-6</sup> перп С	α, 10 <sup>-6</sup> паралл С	<i>α</i> , 10 <sup>-6</sup> , усред
-100	2,30	2,72	2,51
-50	3,52	4,08	3,80
0	4,54	5,20	4,87
25	4,96	5,67	5,32
50	5,38	6,14	5,76
100	6,06	6,86	6,46
150	6,61	7,41	7,01
200	7,01	7,85	7,43
250	7,37	8,20	7,79
300	7,62	8,48	8,05
350	7,86	8,72	8,29

Таблица 1.3. Температурная зависимость ТКЛР лейкосапфира [28].

Аппроксимируем эту зависимость полиномом  $\alpha(T) = -4,163 + 0,04896 T - 6,801 10^{-5} T^2 + 3,448 10^{-8} T^3$ . Отметим, что значения ТКЛР, приведенные в [51], неправдоподобно высоки и превышают значения, приведенные в других источниках на два порядка.



Рис 1.9. Зависимость коэффициента линейного расширения лейкосапфира от температуры и ориентации относительно оси симметрии С.

# - Свойства материалов межсоединений. Припой и сварка.

Из всех известных способов соединения сапфира с металлом, только пайка твердыми припоями обеспечивает надежное соединение ПЧЭ с материалом мембраны, причем смачивание сапфира происходит при наличии титана, растворенного в припое. В настоящее время, для пайки обычно используется припой Пср72, а транспорт титана к кристаллу обеспечивается растворением титана из материала металлической мембраны. Механические свойства слоя припоя практически не изучены и при расчетах, сделаем допущение, что свойства припоя эквивалентны свойствам чистого серебра.

В [54] для серебра приведены данные  $E = 72 \div 83$  ГПа; v = 0.37;  $\sigma_{02} = 20 \div 30$  МПа ;  $\sigma_{\rm B} = 140 \div 180$  МПа , примем E = 75 ГПа и v = 0.37 . Табулированные значения ТКЛР серебра из [54] приведены в таблице 1.4. Аппроксимируем зависимость  $\alpha(T) = 15,08 + 0,03 T - 1,357 10^{-5} T^2$  в диапазоне температур T= -70÷325 °C.

 T, °C
 -70
 25
 125
 225
 325

  $\alpha, K^{-1} 10^{-6}$  20,2
 23,3
 24,5
 26,2
 28,1

Таблица 1.4. Температурная зависимость ТКЛР серебра [54].

Пределы пластичности и текучести  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{\rm B}$  паяного слоя возьмем как для материала BT-9, т.к. при расчетах распределения деформаций при воздействии давления величины механических напряжений превышают приведенные данные для серебра, однако заметной пластической деформации экспериментально не наблюдается. Свойства сварочного шва примем эквивалентными свойствам основного материала BT9.

#### - Свойства кремния

При расчете конечно-элементных моделей, использованных в этой работе, определялась деформация на поверхности сапфира. В силу малой толщины кремниевых тензорезисторов (0,6-0,8 мкм), можно считать, что они не оказывают влияния на распределение деформаций на поверхности ПЧЭ и поверхностная деформация ПЧЭ  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_t$  полностью передается в ТР. Исходя из этого допущения, относительное изменение величин тензорезисторов можно рассчитывать по формулам (4)-(5). На Рис 1.10. [28] приведена зависимость коэффициентов эластосопротивления от температуры, причем коэффициенты  $m_{11}$  и  $m_{12}$ , определены для концентрации  $N = 6.0 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, а  $m_{44}$  для  $N = 5.4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Изменение уровня легирования кремния на 10% при

определении  $m_{11}$  и  $m_{12}$  дает пренебрежимо малый вклад в общее изменение сопротивления тензорезистора при деформации. В дальнейшем при расчетах тензочувствительности примем, если не оговорено особо, что уровень легирования *Si* в КНС структурах  $N = 5.4 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> и температурная зависимость тензочувствительности определятся по данным рис 1.10. Эти зависимости  $m_{ij}(T)$  были аппроксимированы полиномами третьей степени:  $m_{ij}(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3$  в диапазоне температур 20÷400 °C, коэффициенты полиномов приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Коэффициенты полиномов, аппроксимирующих температурную зависимость коэффициентов эластосопротивления.

	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$m_{44}$	94.9	-0.164	0.000120	-3.15E-8
$m_{11}$	-4.14	0.0707	-0.000154	9.27E-8
$\overline{m}_{12}$	-3.48	0.0848	-0.000192	1.21E-7



Рис 1.10. Температурные зависимости коэффициентов эластосопротивления p-КНС [28], сплошные линии – принятая аппроксимация.

#### 1.3.2. Разбиение области моделирования на конечные элементы.

По чертежам деталей ТП производилась оцифровка геометрических примитивов (отрезков дуги), образующих области моделирования, причем производилось упрощение геометрии деталей увеличением длины прямолинейных участков границ детали в местах заведомо малых градиентов деформаций. Это упрощение позволяет использовать более крупные конечные элементы (КЭ), что приводит к уменьшению требуемых вычислительных ресурсов, без потери точности расчетов.

Качество разбиения оценивалось известным эмпирическим правилом, если при двукратном сгущении сетки решение в интересующей области существенно не изменяется, то конечно-элементная сетка корректна.



Рис 1.11. Пример сетки с уменьшением размеров КЭ в области с высоким градиентом напряжений. Область сопряжения мембраны УЭ с его корпусом является концентратором напряжений.

Для оценки предельных напряжений, возникающих при нагружении, можно использовать критерий фон Мизеса [34]. Этот критерий определяет возникновение пластических деформаций в конструкции, когда величина напряжений  $\sigma_i$  превышает предел пластичности.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}{2}}$$

Следует отметить, что предел пластичности это экспериментально определяемый параметр материала, который определяется как величина напряжения при растяжении или сжатии, после снятия которого остаточная деформация составляет оговоренную величину. Нормируется остаточная деформация как 0.2% ( $\sigma_{02}$ ), 0.05% ( $\sigma_{005}$ ) и 0.01% ( $\sigma_{001}$ ).

#### 1.3.3. Алгебраизация дифференциального уравнения.

Рассмотрим некое деформированное тело в цилиндрической системе координат ( $\rho$ ,  $\varphi$ , z), ограниченное поверхностью S и занимающее объем V. Пусть на тело действуют поверхностные и объемные силы. Поверхностные силы приложены к поверхности S, и они могут возникать под действием давления либо системы сосредоточенных нагрузок. Объемные силы существуют в объеме  $V_f$ , принадлежащему V, и возникают под действием температурных напряжений, воздействия силы тяжести и т.д.

Допустим, что до приложения нагрузки тело не было деформированным. После приложения нагрузки каждая точка тела перемещается на величину *вектора смещения*  $u(\rho, \varphi, z)$ . Деформированное состоянии тела полностью описывается *тензором деформации*  $\varepsilon_{ij}(\rho, \varphi, z)$ :

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{\rho\rho} & \varepsilon_{\rho\varphi} & \varepsilon_{\rhoz} \\ \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{\varphi\rho} & \varepsilon_{\varphi\varphi} & \varepsilon_{\varphiz} \\ & \varepsilon_{z\rho} & \varepsilon_{z\varphi} & \varepsilon_{zz} \end{aligned}$$

Отметим, что тензор деформации симметричен, т.е.  $\varepsilon_{\rho\varphi} = \varepsilon_{\varphi\rho}$ ,  $\varepsilon_{\rho z} = \varepsilon_{z\rho}$ ,  $\varepsilon_{\varphi z} = \varepsilon_{z\varphi}$ . В случае осесимметричной задачи деформации не зависят от угла  $\varphi$  и  $u_{\varphi} = 0$ ,  $\varepsilon_{\rho\varphi} = \varepsilon_{\varphi\rho} = 0$ . Следовательно, деформации и сдвиги будут

зависеть только от двух координат  $\rho$  и *z*. Связь между тензором деформации и вектором смещения записывается в виде [55]:

$$\varepsilon_{\rho\rho} = \frac{\partial u_{\rho}}{\partial \rho}; \ \varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_{\rho}}{\rho}; \ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_{z}}{\partial z}; \ \varepsilon_{z\rho} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_{z}}{\partial \rho} + \frac{\partial u_{\rho}}{\partial z} \right)$$
(19)

Закон Гука связывает силы, возникшие в теле (механические напряжения) с деформациями, а поскольку деформация описывается тензором, то и напряжения также являются тензором:

$$\begin{split} \sigma_{\rho\rho} &= 2\beta \varepsilon_{\rho\rho} + \lambda e & \sigma_{\rho\varphi} = \sigma_{\varphi\rho} = \beta \varepsilon_{\rho\varphi} \\ \sigma_{\varphi\varphi} &= 2\beta \varepsilon_{\varphi\varphi} + \lambda e & \sigma_{\rhoz} = \sigma_{z\rho} = \beta \varepsilon_{\rhoz} \\ \sigma_{zz} &= 2\beta \varepsilon_{zz} + \lambda e & \sigma_{\varphi z} = \sigma_{z\varphi} = \beta \varepsilon_{\varphi z} \\ e &= \varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz} \end{split}$$

где  $\beta$  – модуль сдвига,  $\lambda$  – постоянная Ламэ. Для случая осесимметричной задачи  $\sigma_{oz} = \sigma_{\omega z} = 0$ .

Для удобства дальнейшего изложения перейдем к векторной форме записи деформаций и напряжений, ограничивая круг рассматриваемых задач осесимметричным случаем. В силу симметрии тензоров  $\varepsilon$  и  $\sigma$  они однозначно описываются векторами, и для отличия их от тензоров будем записывать их в квадратных скобках.

$$[\varepsilon]^T = \left[\varepsilon_{\rho\rho}, \varepsilon_{\varphi\varphi}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{\rho z}\right]^T \qquad [\sigma]^T = \left[\sigma_{\rho\rho}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{zz}, \sigma_{\rho z}\right]^T$$

Связь между векторами смещения, деформации и напряжений запишем как:

$$\varepsilon = [L]u \qquad \qquad [\sigma] = [D][\varepsilon]$$

Здесь [L] является дифференциальным матричным оператором связи

деформации с перемещениями, [D] – матрица упругих постоянных материала, которая связывает деформации с напряжениями.

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \rho} & 0\\ \frac{1}{\rho} & 0\\ 0 & \frac{\partial}{\partial z}\\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}; \quad [D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0\\ 1-\nu & 1-\nu & \nu & 0\\ \nu & \nu & 1-\nu & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix},$$

где *µ* – коэффициент Пуассона, *E* – модуль Юнга;

Для перехода непосредственно к конечно-элементной формулировке задачи эластостатики воспользуемся принципом минимума потенциальной энергии деформированного тела. Из всех возможных кинематических перемещений точек деформированного тела действительны только те, которые приводят к минимуму потенциальной энергии:

$$\int_{V} \varepsilon^{T} \sigma dV - \int_{V} F_{V} \delta u dV - \int_{S} F_{S} \delta u dS = min$$
<sup>(20)</sup>

Символ  $\delta$  обозначает малые вариации параметра. Здесь первое слагаемое описывает работу по деформацию твердого тела, а остальные работу, совершаемую внутренними и внешними силами.

Разобьем моделируемую область на конечные элементы. В случае осевой симметрии в качестве КЭ удобно выбрать кольца с треугольным сечением (Рис 1.12). Индексами *i*, *j*, *k* обозначим вершины треугольника, имеющие координаты  $z_i \rho_i, z_j \rho_j, z_k \rho_k$ . Пусть перемещения внутри КЭ задаются набором интерполирующих функций N - функций формы. Тогда перемещения всех точек тела будут определяться ограниченным набором перемещений узлов КЭ. Таким образом, для решения поставленной задачи

статики необходимо найти ограниченное множество значений для каждого КЭ –  $u_{ijk}$ .



Рис. 1.12. Сечение треугольного кольцевого элемента.

$$[u] \approx N[u_{ijk}]$$
  

$$[u_{ijk}] = (u_{\rho i}, u_{zi}, u_{\rho j}, u_{zj}, u_{\rho k}, u_{zk})^{T}$$
  

$$N = \begin{bmatrix} N_{i} & 0 & N_{j} & 0 & N_{k} & 0\\ 0 & N_{i} & 0 & N_{j} & 0 & N_{k} \end{bmatrix}$$

Поскольку в конечный элемент не вводятся дополнительные точки, то однозначное задание функции N возможно только линейной интерполяцией. Для примера запишем функцию формы узла *i*. Функции  $N_j$  и  $N_k$  получаются из  $N_i$  циклической перестановкой индексов.

$$N_i = \frac{1}{2\Delta} \left( a_i + b_i u_{\rho i} + c_i u_{z i} \right)$$

$$a_i = \rho_j z_k - z_j z_k;$$
  $b_i = z_j - z_k;$   $c_i = \rho_k - \rho_j;$   
 $\Delta = 0.5 \left( (\rho_j - \rho_i) (z_i - z_k) + (\rho_k - \rho_i) (z_j - z_i) \right)$   
где  $a_i, b_i, c_i$  – коэффициенты функции формы узла  $i$   
 $u_{\rho i}, u_{z i}$  – проекции перемещения узла  $i$   
 $\rho_i, z_i, \rho_j, z_j, \rho_k, z_k$  – координаты соответствующих узлов треугольника  
 $\Delta$  - площадь треугольника  $ijk$ 

Запишем аппроксимацию вектора деформаций:

$$[\varepsilon] = [L][u] \approx [B][u_{ijk}]$$
$$[B] = \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0\\ N_i/\rho & 0 & N_j/\rho & 0 & N_k/\rho & 0\\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k\\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}$$

Отметим, что функция  $[u_{ijk}]$  не зависит от локальных координат КЭ и при интегрировании может быть вынесена за знак интеграла. Подставив полученные аппроксимации для  $\varepsilon, \sigma, u$  в выражение (20) и приравняв его к нулю, получим выражение для минимума потенциальной энергии для одного конечного элемента *ijk*:

$$\int_{V_{ijk}} [B]_{ijk}^{T} [D]_{ijk} [B]_{ijk} dV [u_{ijk}] = \int_{V_{ijk}} F_{V_{ijk}} [N] dV + \int_{S_{ijk}} F_{S_{ijk}} [N] dS$$

Поскольку матрицы явно зависят от радиуса  $\rho$  в локальной системе координат, то интегралы можно аппроксимировать их численными аналогами первого порядка. Окончательно СЛАУ, описывающих упругую деформацию осесимметричного тела, запишем в виде:

$$[R][U] = [F]$$

$$[R] = 2\pi \sum_{m=1}^{M} \rho_m [B]_m^T [D]_m [B]_m$$

$$[F] = \sum_{m=1}^{M} F_{V_m} [N]_m + \sum_{m=1}^{M} F_{S_m} [N]_m$$
(21)

где: [*R*] – матрица реакций

[U] – вектор смещений всех вершин КЭ

М – число КЭ

[F] – вектор, определяемый нагружением и внутренними силами

 $\rho = (\rho_i + \rho_i + \rho_k)/3$  – средний радиус конечного элемента *m* 

Таким образом получена аппроксимация дифференциального уравнения эластостатики (19) (состояния упругого равновесия) системой линейных алгебраических уравнений (21). После введения граничных и начальных условий получим полностью определенную СЛАУ.

#### 1.3.4. Вывод результатов расчета, визуализация данных.

Для разработчиков ТП наиболее удобным способом представления результатов расчета являются эпюры поля напряжений с цветовой градацией графики распределения компонент тензора деформаций. Прямыми И результатами расчета напряженно-деформированного состояния УЭ ТП являются величины перемещений узлов КЭ. Зная величины перемещений узлов КЭ, можно получить компоненты тензора деформаций, а зная деформацию и механические свойства материала, можно рассчитать напряжения. Рассмотрим результаты расчета на примере одномембранных ТП. Для наглядности возьмем ТП на малый и на большой диапазон измеряемых давлений. На Рис 1.13 и 1.15 представлены эпюры поля напряжений\*, а на Рис 1.14 и 1.16 – графики распределения в УЭ радиальной и тангенциальной составляющих тензора деформаций, возникающих при нагружении УЭ. Из Рис 1.15 видно, что величина напряжений в слое припоя находится в диапазоне 120..230 МПа, что значительно превышает не только предел пластичности, но и предел прочности для чистого серебра [54], о чем упоминалось выше, однако заметных погрешностей при измерении

<sup>\*</sup>расчетные данные предоставлены Пироговым А.В.



Рис 1.13. Расчетная интенсивность напряжений по фон Мизесу. Величины смещений условно увеличены в 100 раз. Тестовый ТП с конструктивными параметрами: P=4МПа; h =0.21мм;  $h_{\Pi 4 \Im}$  =0.12мм;  $h_{np}$  =0.03мм;  $r_{oFT}$  =0.2мм;  $r_o$  =3.9мм.



Рис 1.14. Расчетное распределение деформаций на поверхности ПЧЭ (сплошные линии) для тестового ТП, приведенного на Рис 1.13, при нагружении давлением. Пунктирными линиями показаны деформации, рассчитанные по аналитическим формулам (14) и (15).



Рис 1.15. Расчетная интенсивность напряжений по фон Мизесу. Величины смещений условно увеличены в 100 раз. Тестовый ТП с конструктивными параметрами: P=160МПа; h=1.5мм;  $h_{\Pi 4 \Im}=0.12$ мм;  $h_{np}=0.03$ мм;  $r_{oFT}=0.2$ мм;  $r_o=2.35$ мм.



Рис 1.16. Расчетное распределение деформаций на поверхности ПЧЭ (сплошные линии) для тестового ТП, приведенного на Рис 1.15, при нагружении давлением. Пунктирными линиями показаны деформации, рассчитанные по аналитическим формулам (14) и (15).

давления, обусловленных пластической деформацией, не наблюдалось. Возможно, что это связано с образованием твердых интерметаллических соединений Ti-Ag и Ti-Cu в слое припоя. На Рис 1.13 и 1.16 приведены расчетные распределения деформаций на поверхности ПЧЭ, полученные с помощью численных расчетов и с помощью аналитических зависимостей (14) и (15). Из них видно, что при описании реальных ТП результаты, полученные по численной и аналитической моделям очень сильно расходятся, причем, чем больше диапазон измеряемых давлений ТП (соответственно больше толщина мембраны УЭ), тем больше расхождение.

#### Выводы к главе 1.

- 1. Используемые В настоящее время при проектировании тензопреобразователей давления аналитические выражения для расчета деформаций на поверхности упругого элемента чашечного типа, исходящие из жесткого закрепления мембраны на краю, не отражают реальной картины распределения деформаций и соответственно не обеспечивают оптимального расположения тензорезисторов на поверхности упругого элемента.
- Численная модель ТП давления с использованием метода конечных элементов дает результаты по распределению деформаций на поверхности УЭ ТП давления принципиально отличающиеся от полученных аналитическим путем.
- Для экспериментальной проверки и уточнения численной модели ТП с учетом особенностей конструкции ТП давления на основе структур КНС необходимо проведение экспериментальных исследований распределения деформаций на поверхности упругого элемента.
- Результаты экспериментальных исследований и построенной с их учетом численной модели позволят проектировать ТП давления с улучшенными метрологическими характеристиками.

Глава 2. Экспериментальное исследование распределения изменения сопротивления тензорезисторов по поверхности ПЧЭ для ТП давления с круглыми мембранами.

#### 2.1. Методика эксперимента.

Для экспериментального исследования распределения изменения сопротивления и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) тензорезисторов была использована методика, описанная в работе [57]. Специально разработанная тестовая структура на основе КНС размером 10х10 мм, жестко соединяемая с исследуемой мембраной ТП из титанового сплава ВТ-9 пайкой в вакууме припоем ПСР-72 (Рис 2.1.). Ее топология представляет собой последовательное соединение малобазных (130×30×0,6 мкм радиальных и 230×30×0,6 мкм тангенциальных) тензорезисторов, расположенных по диаметру исследуемой мембраны ТП и ориентированных



Рис 2.1. Тестовая структура на поверхности сапфирового чувствительного элемента ТП с титановой упругой мембраной.

по кристаллографическим направлениям <110> кремния (такое направление кристаллографической ориентации обусловлено зависимостью чувствительности кремниевых ТР от их кристаллографического направления [32]), со множеством необходимых выводов. Выводы от ТР соединялись с коммутационной платой алюминиевыми проводниками диаметром 50 мкм с Экспериментально помощью ультразвуковой сварки. определялось сопротивления ТР тестовой структуры а также их изменение под действием давления при различных температурах. Сопротивления тензорезисторов измерялись по падению напряжения на ТР с использованием системы сбора данных Agilent 34970A с погрешностью измерения постоянного напряжения 0,006%. Управление системой велось дистанционно С помощью персонального компьютера (ПК). В качестве токоизмерительного резистора использовался образцовый резистор РЗЗ1 на 100 Ом класса точности 0,01. Давление задавалось грузопоршневыми манометрами класса 0,05. Для ТΠ исключения влияния изменения температуры В результате адиабатического сжатия и расширения рабочей жидкости грузопоршневого манометра при нагружении и снятия нагрузки соответственно, фиксирование измеряемого сигнала производилось по истечении 2 минут после подачи давления. Измерения проводились при стационарных (выдержка не менее 1.5 часов) температурах от -40 °C до +180 °C. Для этого использовались термокамеры типа ТВТ-1 и СНОЛ. Температура образцов измерялась термопарой хромель-копель с точностью не хуже ±1°С. Для снижения случайной составляющей погрешности замеры напряжений при каждом испытании производились не менее 50 раз, после чего вычислялось среднее значение. При этом общая погрешность косвенного измерения сопротивления ТР, рассчитанная по [58], не превышала 0,1%.

Схема измерительного оборудования для испытаний ТП с тестовыми структурами приведена на Рис 2.2. Для повышения точности измерения сигналов вплоть до 1 мкВ, были приняты меры по борьбе с разными видами помех. Для борьбы с синфазными помехами все измерительные провода



Рис 2.2. Структурная схема измерительного оборудования.

изготавливались в виде витых пар. Снижение влияния высокочастотных электромагнитных помех достигалось экранировкой всех измерительных кабелей и провода питания. Для исключения низкочастотных помех по сети питания ТП в качестве источника питания использовалась аккумуляторная батарея достаточной емкости. Помимо этого, система сбора данных Agilent 34970A для борьбы с сетевыми наводками, кратными 50 Гц, выполняло интегрирование входного сигнала в течение четного количества периодов сети питания.

#### 2.2. Распределение изменения сопротивления ТР.

#### 2.2.1. Одномембранные преобразователи.

В работе были исследованы одномембранные ТП с мембранным упругим элементом чашечного типа, схематически изображенные на Рис 2.3 Конструктивные параметры мембраны УЭ изменялись в следующих пределах:  $h=0,3\div3,5$  мм;  $r_0=2,0\div3,9$  мм. На Рис 2.4 представлены типичные зависимости относительного изменения сопротивления радиальных и тангенциальных ТР от расстояния до центра мембраны r под действием подаваемого давления. Также на этом рисунке для каждого конструктива наряду с экспериментальными данными приведены расчетные распределения аналогичных зависимостей, полученные по формулам (4-5) и (14-15). Из рисунка видно, что в реальных ТП условие жесткого защемления, т.е. когда деформации сразу за границей мембраны (соответственно вместе с изменением сопротивления TP) обращаются в нуль, не выполняется. Видно также, что экстремум чувствительности TP смещен относительно края



Рис 2.3. Одномембранный ТП давления [47]:

- 1 сапфировый ПЧЭ с кремниевой тестовой тензочувствительной схемой;
- 2 упругая титановая мембрана.
- 3 коллектор.







Рис 2.4. Экспериментальные (точки) и рассчитанные по (4-5) и (14-15) (линии) распределения относительного изменения сопротивления радиальных (1) и тангенциальных (2) тензорезисторов по радиусу мембраны ТП с разными конструктивными параметрами (стрелкой указано расстояние  $r_0$ ).

мембраны. Помимо этого наблюдается еще один интересный факт: чувствительность у радиальных и тангенциальных ТР в середине мембраны (*r*=0) одинаковая, но отличная от нуля. Однако, как еще известно из [48], изотропное сжатие кремниевого ТР не изменяет его сопротивления, а анизотропное изменяет. Полученный результат означает, что в мембране присутствуют деформации, которые имеют направления, отличные от радиального или тангенциального. Аналогичная картина наблюдалась и на остальных исследованных образцах. По-видимому, это связано с анизотропией механических свойств сапфира.

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:

$$\delta = (\Delta R_t / R - \Delta R_r / R) / 2 \tag{22}$$

Физический смысл величины  $\delta$  – это относительная чувствительность ТП. На Рис 2.5 представлены результаты экспериментального определения распределения величины  $\delta$  по поверхности ПЧЭ с различным отношением толщины *h* упругой мембраны к ее радиусу  $r_0$  для одномембранных ТП. Как видно из рисунка, экстремум величины  $\delta$  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 ( $0.75 \leq h/r_0 \leq 1.2$ ) –за ее границу и расплывается. Наконец, при достаточной толщине мембраны ( $h/r_0 > 1.2$ ) максимум исчезает, и основной вклад в



Рис 2.5. Распределение относительной чувствительности ТП по радиусу УЭ при разных значениях отношения толщины мембраны к ее радиусу.

деформацию поверхности ПЧЭ вносит не мембрана, а боковые стенки чашечного основания мембраны. Как уже упоминалось, в работах [37, 59] была предложена эмпирическая формула для величины смещения  $\Delta r$  экстремума тензочувствительности  $\delta$  за границу мембраны  $r_0$ :

$$\Delta r = h(h/k)^{4,5} \tag{23}$$

где *k* – постоянная величина, равная 1,6 мм. Результаты наших исследований [60], экстремума показывают смещение кривой относительной что чувствительности ТΠ за границу мембраны не описывается этой эмпирической формулой, в которой учитывается только толщина мембраны. На Рис 2.6 приведены результаты экспериментальных измерений смещения  $\Delta r$  максимума величины  $\delta$  при различных толщинах и радиусах мембраны П. Там же приведены экспериментальные результаты из [37] и график, построенный по формуле (23). Как видно из рисунка, смещение экстремума  $\delta$ зависит не только от толщины мембраны, но и от ее радиуса. Формула (23)



Рис 2.6. Смещение положения максимума относительной чувствительности ТП от края упругой мембраны в зависимости от толщины мембраны при различных радиусах мембраны: ◇ – данные работы [37]; пунктирная кривая построена по формуле (23); сплошные кривые – численное моделирование по МКЭ (предоставлены Пироговым А.В.).

неплохо описывает смещение экстремума  $\delta$  только при одном фиксированном значении  $r_o$ , так что пользоваться ею для практических расчетов топологии тензосхемы при произвольных значениях размеров упругой мембраны нельзя.

Практически всегда, как при расчете деформаций по классической теории [34-36], так и при экспериментальном исследовании деформаций [37] не принимается во внимание внешний диаметр УЭ чашечного типа. На Рис 2.7. представлены результаты исследования влияния размера наружного распределение относительной диаметра упругого элемента на чувствительности ТΠ поверхности ПЧЭ фиксированных по при конструктивных параметрах ( $r_0$  и h) мембраны. Как видно из рисунка, чувствительность ТП при расположении ТР на мембране практически не зависит от размера наружного диаметра *D* кольцевого основания чашки УЭ.

Распределение же чувствительности ТП при расположении ТР за краем мембраны начинает зависеть от внешнего диаметра *D* при определенных



Рис 2.7. Распределение относительной чувствительности ТП по радиусу УЭ при разных диаметрах основания мембраны *D* и двух значениях отношения *<i>h*/*r*<sub>o</sub>.

значениях отношения  $h/r_0$ . Одновременно несколько смещается и положение экстремума величины  $\delta$ . На Рис 2.8. приведены результаты экспериментальных измерений смещения максимума величины  $\delta$  от края



Рис 2.8. Смещение положения максимума относительной чувствительности ТП от края упругой мембраны в зависимости от диаметра основания мембраны D при двух значениях отношения  $h/r_o$ 

мембраны при различных толщинах мембраны ТП и диаметрах ее кольцевого основания. Из рисунка следует, что существуют такие значения отношения  $h/r_0$ , при которых положение экстремума относительной чувствительности ТП не зависит от диаметра D.

# 2.2.2. Двухмембранные преобразователи.

Двухмембранная конструкция ТП позволяет расширить диапазон измерения в сторону низких давлений а также создавать ТП с открытой мембраной, например, для измерения давления вязких и кристаллизирующихся сред. Кроме того, изменяя материал воспринимающей давление мембраны, можно изготавливать датчики для измерения давления различных агрессивных сред.

По вышеизложенной методике в работе были исследованы двухмембранные ТП (Рис 2.9). Конструктивные параметры мембраны с жестким центром, выполняющей роль УЭ, изменялись в следующих пределах:  $h = 0,1\div0,6$  мм;  $r_1 = 1,1\div2,0$  мм;  $r_0 = 3,2\div3,9$  мм. На Рис 2.10 представлены типичные зависимости относительного изменения



Рис 2.9. Двухмембранный ТП давления [47]:

- 1 сапфировый ПЧЭ с кремниевой тензочувствительной схемой;
- 2 упругая титановая мембрана; 3 коллектор;
- 4 приемная мембрана; 5 соединительный шток.





сопротивления радиальных и тангенциальных ТР от расстояния r до центра мембраны под действием подаваемого давления от 10 до 600 кПа, характерные для данного конструктива. Как видно из рисунка, условие жесткого защемления для таких преобразователей, как И ЛЛЯ одномембранных ТП, тоже не выполняется. Относительные изменения сопротивления ТР, а, следовательно, и деформация, не равны нулю и за внешней границей мембраны (указана стрелкой) и на жестком центре (его граница тоже указана стрелкой). В отличие от одномембранных ТП, у двухмембранных распределение изменений сопротивления радиальных и тангенциальных ТР по радиусу имеет два экстремума, противоположных по знаку: вблизи края закрепления мембраны и у края жесткого центра. Это обстоятельство позволяет для таких ТП проектировать мостовые тензосхемы, в которых в смежных плечах моста могут быть не только радиальные и тангенциальные ТР (как на краю мембраны, так и на жестком центре) но и тензосхемы с радиально-радиальными или тангенциально-тангенциальными ТР, расположенными у края жесткого центра и у внешнего края мембраны.

На Рис 2.11 представлены результаты экспериментально измеренного распределения величины  $\delta$  по поверхности ПЧЭ с различным отношением толщины h упругой мембраны к ее радиусу  $r_0$  длядвух значений отношения  $r_1/r_0$  двухмембранного ТП. Выше было показано, что для одномембранного П имеет место смещение экстремума величины  $\delta$ , зависящее от отношения  $h/r_0$ . Как видно из рисунка, двухмембранным ТП тоже присуще это явление, только смещение экстремумов величины  $\delta$  имеет более сложный характер, зависящий не только от величины  $h/r_0$ , но и от отношения  $r_1/r_0$ . На Рис 2.12 экспериментальных измерений приведены результаты смещения экстремумов  $\delta$  при различных толщинах и радиусах мембраны ТП. Для одномембранных ТП из Рис 2.6 следовало, что при увеличении толщины мембраны экстремум смещается в направлении от центра к периферии мембраны. Для двухмембранных ТΠ картина складывается противоположная: при увеличении толщины мембраны экстремум



Рис 2.11. Распределение относительной чувствительности ТП по радиусу УЭ для двух значений отношения  $r_l/r_{\theta}$  (*a* и  $\delta$ ) и разных отношений  $h/r_{\theta}$  (пунктирной линией указано положение жесткого центра).

величины  $\delta$  как на краю мембраны  $\delta_o$ , так и на жестком центре  $\delta_l$ , смещается в сторону центра мембраны. Интересен и тот факт, что для реально изготавливаемых двухмембранных ТП ( $h \ge 0.1$  мм), существуют такие значения отношения  $r_1/r_0$ , при которых экстремум  $\delta_o$  всегда расположен



Рис 2.12. Смещение положения экстремума  $\delta$  от края упругой мембраны ( $\Delta r_0$ ) и жесткого центра ( $\Delta r_1$ ) в зависимости от толщины мембраны при различных радиусах мембраны

на мембране. Из Рис 2.11 видно также, что относительные величины экстремумов чувствительности ТП зависят и от отношения  $h/r_0$ . На Рис 2.13. для испытанных образцов приведены отношения величин экстремумов



Рис 2.13. Отношение максимумов относительной чувствительности ТП на жестком центре  $\delta_l$  и краю мембраны  $\delta_0$  в зависимости от толщины мембраны при различных радиусах мембраны.

на жестком центре  $\delta_o$  и периферии мембраны  $\delta_l$ , в зависимости от толщины мембраны для двух отношений радиусов  $r_1/r_0$ . Из представленных данных видно, что чем толще становится мембрана, тем меньше становится экстремум на жестком центре. Кроме этого при увеличении значения отношения  $r_1/r_0$  зависимость  $\delta_l/\delta_o$  от толщины верхней мембраны h становится менее заметной.

# 2.3. Сравнение экспериментально полученных профилей деформаций с расчетными данными.

При решении задач напряженно-деформированного состояния УЭ в решении обычно приводят эпюры распределения напряжений или деформаций вдоль радиуса УЭ. В первой главе были рассмотрены различные теоретические модели, используемые при проектировании ТП. Для того чтобы проверить адекватность этих теоретических моделей проведем сравнение расчетных и экспериментально полученных эпюр распределения деформаций вдоль радиуса УЭ.

В предыдущем параграфе были приведены результаты экспериментального измерения распределения относительного изменения сопротивления ТР по радиусу УЭ мембранного типа. Для пересчета распределения относительного изменения сопротивления ТР в распределение деформаций решим систему уравнений (4) - (5) относительно  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_t$ . В результате (см. приложение №2) получим зависимости:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R_r / R_r + \Delta R_t / R_t}{2m_{11} + 2m_{12}(1 - 2v_k)} + \frac{\Delta R_r / R_r - \Delta R_t / R_t}{4m_{44}}$$
(24)

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_r / R_r + \Delta R_t / R_t}{2m_{11} + 2m_{12}(1 - 2v_k)} - \frac{\Delta R_r / R_r - \Delta R_t / R_t}{4m_{44}}$$
(25)

# На Рис 2.14 на примере одномембранного ТП представлены результаты

значений радиальных сравнения расчетных И тангенциальных  $\mathcal{E}_r$  $\mathcal{E}_t$  составляющих деформаций с аналогичными экспериментальными данными. Для наглядности здесь выбраны конструктивы ТП с одинаковыми толщинами *h* мембран. радиусами  $r_0$ И разными Как видно ИЗ представленных рисунков, уже начиная с нижних пределов измерения (для одномембранных ТП) зависимости, рассчитываемые по аналитическим





*в)* h=2,0 мм; r<sub>0</sub>=3,5 мм; P<sub>изм</sub>=100 МПа

*г)h*=3,5 мм; *r*<sub>0</sub>=3,5 мм; *P*<sub>изм</sub>=190 МПа

Рис 2.14. Распределение радиальных *ε<sub>r</sub>* (*rad*) и тангенциальных *ε<sub>t</sub>* (*tg*) составляющих деформаций по радиусу мембраны ТП с разными конструктивными параметрами.
 Сплошная линия – результат численного моделирования (предоставлены Пироговым А.В.); Пунктирная линия – результат расчета по аналитическим формулам (14) и (15); Светлые и темные точки – результат экспериментального измерения.

формулам (14) и (15), имеют сильное рассогласование с экспериментальными данными. Из рисунка видно, что максимальные расхождения наблюдаются на краю мембраны  $r_0$  и на основании чашки УЭ, причем, чем больше толщина мембраны h, тем больше расхождение. 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, полученных экспериментальным путем. Из этих данных также видно, что для ТП с мостовой тензорезистивной схемой, состоящей ИЗ радиальных И тангенциальных TP, для получения максимального выходного сигнала, с учетом (1) и (6), ТР не должны целиком располагаться на мембране.

Следует упомянуть, что при выполнении численных расчетов, результаты которых приведены выше, для количественного согласия расчётных значений профилей деформаций с экспериментом учитывались не



Рис 2.15. Расчетное (линии) и экспериментальное (точки) смещение положения максимума разности чувствительностей радиальных и тангенциальных ТР от края упругой мембраны в зависимости от толщины мембраны при двух вариантах закрепления мембраны к штуцеру ТП: *1* – сварка "по катету"; *2* – сварка "в ус".

только параметры мембранного УЭ чашечного типа, но и конструкция ТП в целом. На Рис 2.15 для одномембранного ТП с радиусом мембраны  $r_0=3,5$  мм приведены экспериментальные и расчетные величины смещения положения максимума разности чувствительностей радиальных и тангенциальных ТР от края мембраны в зависимости от толщины мембраны *h*. Как видно, учет конкретного вида сварного шва намного приближает расчетные данные к экспериментальным.

# Выводы к главе 2.

- 1. Разработана методика экспериментального определения распределения деформаций на поверхности УЭ чашечного типа ТП давления.
- 2. Результаты экспериментальных исследований показали, что положение максимума разности изменений сопротивления ТР (относительной чувствительности ТП давления) существенно зависит от геометрических параметров мембраны (радиуса и толщины мембраны) и в меньшей Выявлены диаметра УЭ. степени \_ OT внешнего особенности распределения относительной чувствительности ТП для ОДНО-И двухмембранных ТП давления.
- 3. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что расчет распределения упругих деформаций по поверхности УЭ чашечного типа на основе обычно применяемой аналитической модели мембраны, жестко защемленной по контуру, приводит к неоптимальным результатам при проектировании ТП, поскольку она не описывает распространение поверхностных деформаций за пределы как внешнего контура мембраны, так и за границу жесткого центра.
- 4. Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с результатами расчета деформаций по численной модели ТП, при условии учета в ней конструктивных особенностей ТП давления в целом, а не только геометрических размеров УЭ чашечного типа, доказывает

адекватность численной математической модели ТП давления с УЭ чашечного типа, приведенной в первой главе работы, и ее применимость для расчета реальных конструкций ТП давления одно- и двухмембранного типов.

# Глава 3. Температурные характеристики мембранных ТП давления с ПЧЭ на основе КНС.

# 3.1. Распределение ТКС тензорезисторов.

Как уже говорилось выше, 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 охлаждения из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения сапфира (  $\alpha_{Al_2O_3} \approx 6 \cdot 10^{-6} {}^{\circ}C^{-1}$ ) и титанового сплава (  $\alpha_{\tau i} \approx 9.10^{-4} {}^{\circ}C^{-1}$ ) в такой мембране возникают значительные термические деформации, которые вызывают изменение температурных зависимостей сопротивлений ТР и, следовательно, появление аддитивной составляющей температурной погрешности ТП. В данной работе проведено исследование температурных зависимостей радиальных И тангенциальных ТР на поверхности сапфирового ПЧЭ, напаянного на УЭ чашечного типа из титанового сплава. В работе [17] было показано, что при достаточно высоких уровнях легирования структур КНС в широком интервале удельного сопротивления TP температур изменение С температурой хорошо описывается экспоненциальным законом. Для концентраций легирующей примеси ~ 10<sup>20</sup> см<sup>-3</sup>, используемых в приборах МИДА, этот интервал составляет от -100 до +200 °C.

ПЧЭ Если пренебречь влиянием термической деформации В тензопреобразователях, предположить, то можно что температурная зависимость сопротивления ТР на УЭ по своему характеру близка к соответствующей зависимости для удельного сопротивления кремния. На Рис 3.1. представлены типичные результаты измерения сопротивления *R* радиальных и тангенциальных ТР на тестовой структуре в диапазоне -40...+180 °C температур при отсутствии давления. Полученные
экспериментальные зависимости *R*(*T*) были аппроксимированы двумя видами функций:

$$R = R_0 + \alpha_R T \tag{24}$$

$$R = R_0 e^{\alpha_R T} \tag{25}$$



Рис 3.1. Типичные температурные зависимости сопротивления радиальных (*a*) и тангенциальных (*б*) ТР.

где  $\alpha_R$  – температурный коэффициент сопротивления ТР;  $R_0$  – сопротивление ТР при нулевой температуре (T=0 °C). Подбор коэффициентов  $\alpha_R$  и  $R_0$  производился методом наименьших квадратов (МНК). Для случая линейной аппроксимирующей функции записывается условие:

$$\sum_{i=1}^{n} (R_i - (R_0 + \alpha_R T_i))^2 = \min$$
(26)

Не углубляясь в вывод формул можно записать выражения для нахождения коэффициентов  $\alpha_R$  и  $R_0$ , удовлетворяющих условию (26) [61]:

$$\alpha_{R} = \frac{n \sum_{i=1}^{n} T_{i} R_{i} - \sum_{i=1}^{n} T_{i} \sum_{i=1}^{n} R_{i}}{n \sum_{i=1}^{n} T_{i}^{2} - \left(\sum_{i=1}^{n} T_{i}\right)^{2}}$$
(27)

$$R_{0} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_{i} - \alpha_{R} \sum_{i=1}^{n} T_{i}}{n}$$
(28)

Для нахождения постоянных коэффициентов в выражении (25) с помощью МНК, это выражение сначала нужно линеаризовать. Линеаризация достигается путем логарифмирования (25), после чего получаем соотношение:

 $\ln R = \ln R_0 + \alpha_R T$ 

Произведем замены:  $\ln R = Y$  и  $\ln R_0 = B$  и получим выражение, для нахождения коэффициентов которого можно применить МНК:

 $Y = B + \alpha_R T$ 

Для оценки степени точности описания аппроксимирующими функциями экспериментальных данных на Рис 3.2. приведены величины отклонения экспериментальной температурной зависимости сопротивлений ТР от линейной и экспоненциальной зависимостей.

Как видно из рисунка, как для радиальных, так и для тангенциальных ТР в диапазоне температур -40...+180 °С экспериментальные зависимости лучше аппроксимируются экспоненциальной функцией (отклонение не превышает 0,2%), поэтому для дальнейшего анализа температурных зависимостей ТР была выбрана функция вида (25).



Рис 3.2. Величина отклонения экспериментальной температурной зависимости сопротивления радиальных (*a*) и тангенциальных (*б*) ТР от линейной (○) и экспоненциальной (▲) аппроксимирующих функций.

### 3.1.1. Распределение ТКС в одномембранных ТП.

Результаты измерения температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) ТР  $\alpha_R$  тензорезисторов, определяемых из формулы (25) для одномембранных ТП с различными радиусами и толщинами мембран и одинаковой толщиной сапфира приведены на Рис 3.3. Как видно из рисунков, на всех образцах на краю ПЧЭ наблюдаются сильные расхождения ТКС радиальных  $\alpha_{R_r}$  и тангенциальных  $\alpha_{R_t}$  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 (25) определяется разностью ТКС радиальных  $\alpha_{R_r}$  и тангенциальных  $\alpha_{R_r}$  температуров:

$$\frac{\partial U_0(T)}{\partial T} = U_{\text{пит}} \left( \frac{\partial R_t}{R_t \partial T} - \frac{\partial R_r}{R_r \partial T} \right) = U_{\text{пит}} \left( \alpha_{R_t} - \alpha_{R_r} \right)$$
(29)

75





Рис 3.3. 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 3.4 приведены экспериментальные

зависимости разности ТКС радиальных и тангенциальных тензорезисторов  $\Delta \alpha_R = (\alpha_{R_t} - \alpha_{R_r})$  от расстояния до центра упругого элемента тензопреобразователя. Похожие результаты получены в работе [46], в которой утверждается, что вид зависимости  $\Delta \alpha_R(r)$  существенно изменяется при изменении толщины титановой мембраны: чем толще упругая мембрана, тем больше величина  $\Delta \alpha_R$  на одном и том же расстоянии от центра мембраны.



Рис 3.4. Зависимость разности ТКС радиальных и тангенциальных ТР от расстояния до центра ПЧЭ при разных значениях отношения  $h/r_{\theta}$ :  $\Box - 0.15; \bullet - 0.31; \Delta - 0.75; \bullet - 1.15$ 

Однако, как видно из приведенных данных, это не совсем так: 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. 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 (Рис 3.5), хотя отношение толщины

упругой мембраны к ее радиусу изменяется при этом на порядок (от 0,03 до 0,3); только при больших толщинах мембраны температурный дрейф начинает расти.



Рис 3.5. Распределение абсолютных величин температурных дрейфов начального выходного сигнала ТП в диапазоне температур -40..+80 °С для серийных ТП МИДА с различными диапазонами измерения (планки указывают на разброс относительно среднего значения).

Здесь следует заметить, что все приведенные выше зависимости  $\alpha_R(r)$  и статистические данные по температурным дрейфам нулевого сигнала ТП получены при толщине ПЧЭ  $h_{\Pi 43}=0,12$  мм. Эксперимент показывает, что на разность ТКС  $\Delta \alpha_R$  существенно влияет толщина ПЧЭ (Рис 3.6). Чем тоньше ПЧЭ, тем меньше разность ТКС  $\Delta \alpha_R$ . Отсюда можно сделать вывод, что величина и анизотропия термической деформации сапфировой подложки чувствительного элемента определяется параметрами как титановой мембраны, так и самого чувствительного элемента.

В работе также было проведено измерение распределения ТКС  $\Delta \alpha_R$  ТР на свободном ПЧЭ и после его пайки на титановую мембрану. На Рис 3.7 приведены результаты измерений. Как видно, на свободном ПЧЭ ТКС



Рис 3.6. Распределение разности ТКС радиальных и тангенциальных ТР на поверхности УЭ при разных толщинах сапфировой подложки: □ – 0,12 мм; ▲ – 0,08 мм; толщина мембраны *h*=1 мм

радиальных и тангенциальных тензорезисторов практически не отличаются друг от друга, а после пайки на титановую мембрану на краю ПЧЭ возникает большая разность ТКС, затухающая примерно на середине радиуса мембраны. Это является прямым доказательством того, что большая разница



Рис 3.7. Распределение разности ТКС радиальных и тангенциальных ТР на свободном ПЧЭ и после его пайки на мембрану ТП.

ТКС радиальных и тангенциальных ТР на упругом элементе ТП в отсутствие давления является следствием наличия анизотропных термических деформаций.

На величину этих деформаций могут также влиять и конструктивные параметры ТП в целом. Например, на Рис 3.8 приведены распределения разности ТКС  $\Delta \alpha_R$  ТР на мембране с разными внешними диаметрами D УЭ. Как видно из рисунка, распределение разности ТКС  $\Delta \alpha_R$  ТР практически не зависит от D до тех пор, пока толщина стенки чашки УЭ не становится сравнимой с толщиной мембраны.



Рис. 3.8. Распределение разности ТКС радиальных и тангенциальных ТР на поверхности УЭ при разных диаметрах чашки УЭ **D** (стрелкой указан радиус мембраны **r**<sub>0</sub>).

В этом случае чашечный упругий элемент начинает работать как оболочка, а не как мембрана, закреплённая на основании чашки. Поэтому из приведённых данных следует, что для одномембранных ТП характер распределения ТКС радиальных и тангенциальных тензорезисторов на поверхности многослойной мембраны определяется преимущественно свойствами ПЧЭ.

## 3.1.2. Распределение ТКС в двухмембранных ТП.

Ha двухмембранных ТΠ было проведено ТКС также измерение тензорезисторов, расположенных на УЭ параллельно и перпендикулярно относительно диаметра мембраны. На Рис 3.9 для двух ТП с разными конструктивными параметрами представлены распределения ТКС  $\alpha_R$  ТР в зависимости от относительного радиуса  $r/r_0$ . Как видно, зависимость ТКС от положения ТР на ПЧЭ имеет довольно сложный характер, однако во всех случаях вблизи края жесткого центра и, особенно, вблизи края мембраны (и соответственно края ПЧЭ) значения ТКС для радиальных и тангенциальных тензорезисторов сильно различаются (что приводит к значительному температурному дрейфу начального выходного сигнала ТП). Также нужно обратить внимание и на то, что у двухмембранных ТП вид кривой распределения ТКС заметно зависит от толщины мембраны h. На Рис 3.10 приведены распределения разности ТКС  $\Delta \alpha_R$  ТР для нескольких значений толщины h с одинаковым отношением  $r_1/r_0=0,35$ . Из рисунка видно, что на краю мембраны  $(r/r_0=1)$  значение  $\Delta \alpha_R$  примерно одинаково для всех



Рис 3.9. Распределение ТКС радиальных (1) и тангенциальных (2) ТР на поверхности УЭ двухмембранных ТП с конструктивными параметрами (положение края жесткого центра  $r_1$  и мембраны  $r_0$  указаны стрелками): а)  $r_1/r_0=0,34$ ;  $h/r_0=0,047$ ; б)  $r_1/r_0=0,45$ ;  $h/r_0=0,038$ 



Рис 3.10. Зависимость разности ТКС радиальных и тангенциальных TP от расстояния до центра ПЧЭ при разных значениях отношения  $h/r_0$ :  $\Box - 0.030; \bullet - 0.034; \Delta - 0.047$ 

приведенных толщин h, что также согласуется со статистическими данными величины температурного дрейфа нуля приборов МИДА (Рис 3.5, диапазоны менее 0,6 МПа). Однако, вблизи края ПЧЭ зависимость разности ТКС  $\Delta \alpha_R$  ТР от толщины h становится явной, причем чем больше величина h, тем больше зависимости  $\Delta \alpha_R(r/r_0)$  стремятся к виду аналогичных зависимостей для одномембранных ТП.

#### Выводы к главе 3.

впервые 1. Результаты проведенных измерений распределения температурных коэффициентов сопротивления ТР в ТП давления с ПЧЭ на основе структур КНС показали наличие краевого эффекта, ТКС приводящего К значительной разнице В y радиальных И тангенциальных ТР вблизи края ПЧЭ. Это приводит к появлению температурного дрейфа начального сигнала ТП при расположении ТР в мостовой схеме вблизи края ПЧЭ. В двухмембранных ТП давления

разница в ТКС радиальных и тангенциальных ТР кроме края ПЧЭ наблюдается на границе жёсткого центра и на внешней границе мембраны.

- 2. Установлено, что разность ТКС практически не изменяется при изменении отношения толщины упругой мембраны к ее радиусу в широких пределах (от 0,03 до 0,3). При достаточно больших значениях толщины мембраны разность ТКС начинает увеличиваться. Данные результаты согласуются с опытом производства ТП и датчиков давления МИДА, для которых 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.
- 3. При толщине стенки чашки УЭ сравнимой с толщиной мембраны чашечный упругий элемент начинает работать как оболочка, а не как мембрана, закреплённая на основании чашки. Поэтому для таких одномембранных ТП характер распределения ТКС радиальных и тангенциальных тензорезисторов на поверхности многослойной мембраны определяется преимущественно свойствами соединения ПЧЭ с металлической мембраной.
- 4. Учет установленных особенностей распределения температурных коэффициентов сопротивления ТР в ТП давления с ПЧЭ на основе структур КНС при проектировании ТП давления позволит получить датчики с улучшенными температурными характеристиками.

# 4.1. Оптимизация размеров одномембранных ТП для уменьшения нелинейности и вариации выходного сигнала.

Как было показано выше, величина и расположение на мембране экстремума чувствительности ТП зависят от конструктивных параметров измерительной мембраны (её радиуса  $r_0$  и толщины h). С помощью тестовых структур было исследовано распределение относительного изменения сопротивления ТР на стандартных одномембранных ТП, выпускаемых ПГ МИДА [26]. Результаты измерений показаны на Рис 4.1. На этом же рисунке приведены результаты предварительного расчета численными методами. Как видно, результаты расчета неплохо совпали с экспериментальными данными. Учитывая то, что на используемых ПЧЭ середина тензорезистров находится на расстоянии  $r_0 = 3,9$  мм от центра мембраны (r = 0), видно, что экстремумы тензочувствительности не совпадают с местом расположения ТР, причём несовпадение тем больше, чем выше предел измеряемого давления. Это означает, что для получения выходного сигнала определённой ТΠ приходится перегружать величины давлением, ЧТО приводит К увеличению нелинейности и вариации тензопреобразователей.

Если изменить размеры параметров мембран таким образом, чтобы экстремум тензочувствительности оказался в центре тензорезисторов, то можно снизить уровень деформаций в мембране, соответственно и связанные с ним нелинейность и вариацию при сохранении диапазона изменения выходного сигнала. Для этого, используя разработанную модель ТП, был проведен расчет напряженно-деформированного состояния ТП и внесены изменения в конструктив серийно выпускаемых приборов на высокие пределы измерения (от 40 до 160 МПа).

На Рис 4.2 представлены результаты численного расчета и экспериментального измерения относительного изменения сопротивления ТР



в) P<sub>ном</sub>=60 МПа; r<sub>0</sub>=3,0 мм; h=1,4 мм с) P<sub>ном</sub>=160 МПа; r<sub>0</sub>=2,35 мм; h=1,5 мм

Рис 4.1. Распределение относительного изменения сопротивления радиальных (1) и тангенциальных (2) ТР по радиусу мембран серийных приборов МИДА-ДИ13 на разные диапазоны измерения (стрелкой указано положение центра ТР;

лини – данные предварительного расчета по МКЭ (предоставлены Пироговым А.В.)).

на поверхности ТП с модифицированными мембранами. Как видно, на таких ТП экстремумы профилей относительного изменения сопротивления ТР совпадают с положением центров тензорезисторов на ПЧЭ как по расчетным данным, так и по экспериментальным. Это говорит о том, что разработанная в ЗАО МИДАУС математическая модель ТП с достаточной степенью достоверности и адекватности описывает реальные процессы. Для проверки

85

метрологических характеристик была изготовлена опытная партия И ТΠ проведены сравнительные испытания с серийными И оптимизированными мембранами. Из данных испытаний, приведенных в таблице 4.1., размеров следует, что оптимизация мембран дала положительный эффект. Нелинейность выходного сигнала в среднем



в) P<sub>ном</sub>=100 МПа; r<sub>0</sub>=3,65 мм; h=3,0 мм

*г) Р*<sub>ном</sub>=160 МПа; *г*<sub>0</sub>=3,45 мм; *h*=3,3 мм

Рис 4.2. Распределение относительного изменения сопротивления радиальных (1) и тангенциальных (2) ТР на поверхности оптимизированных мембран в ТП датчиков избыточного давления МИДА-ДИ13 на разные диапазоны измерения (стрелкой указано положение центра ТР; лини – данные предварительного расчета по МКЭ (предоставлены Пироговым А.В.)).

Р <sub>изм</sub> , Мпа	Тип мембран	№ ТП	чувствительность, мB/5B	нелинейность, %	вариация, %	гистерезис, %	темп. дрейф нуля, мB/120°C
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 4.1. Метрологические характеристики ТП с серийными и оптимизированными мембранами.

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. При этом чувствительность ТП на 40 МПа увеличилась на 18%, на 100 МПа – на 58%, на 160 МПа – на 10%. И только у ТП на 60 МПа чувствительность снизилась на 10% и составляет в среднем 68 мВ (при  $U_{nut}$ =5 В), что является вполне достаточным. Из табличных данных также видно, что остальные параметры: гистерезис и температурный дрейф нулевого сигнала остались на прежнем уровне.

# 4.2. Оптимизация топологии ПЧЭ для уменьшения температурного дрейфа нулевого сигнала ТП.

У ТП с мостовой тензорезистивной схемой, начальный выходной сигнал (при давлении, равном нулю) зависит от температуры согласно (29). Из этой формулы следует, что температурный дрейф нулевого сигнала определяется разностью ТКС радиальных И тангенциальных тензорезисторов, расположенных в смежных плечах мостовой тензосхемы. Согласно экспериментальным данным по распределению температурных коэффициентов сопротивления по поверхности мембраны ТП, приведенным в главе 3 настоящей работы, 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 приборов вид распределения разности ТКС не зависит от конструктивных параметров ТП. У двухмембранных ТП в области перехода мембраны в кольцевое основание и у жесткого центра



Рис 4.3. Типичные для одно- (*a*) и двухмембранных (*б*) ТП распределения ТКС радиальных и тангенциальных ТР на поверхности УЭ. Стрелками указаны: положение ТР серийных ПЧЭ (*1*), предлагаемое место расположения ТР (*2*) и соответствующие этим положениям величина  $\Delta \propto_R$ .

появляется зависимость от конструктивных параметров мембраны, но за краем мембраны вид распределения разности ТКС, повторяет аналогичные зависимости одномембранных ТП. На Рис 4.3 показано положение ТР ПЧЭ серийных (1). предлагаемое место расположения TP (2)И соответствующие ЭТИМ положениям величины  $\Delta \alpha_R$ на типичных зависимостях распределения ТКС по поверхности мембран одно- (а) и двухмембранных (б) ТП. Как видно из рисунка, при смещении ТР к центру мембраны на 0,9 мм величина  $\Delta \alpha_R$ , а соответственно и температурный дрейф нулевого сигнала должен уменьшиться в 1,5-2,5 раза. При этом, как было показано выше, конструктив мембран можно изменить таким образом, чтобы экстремум кривой тензочувствительности оказался В новом месте расположения ТР.

Учитывая это, была спроектирована новая топология ПЧЭ со смещенными к центру мембраны тензорезисторами. Фотографии старого (МД-007) и нового ПЧЭ (МД-010) приведены на Рис 4.4 в одинаковом масштабе. При этом размер самого ПЧЭ и форма ТР не изменились.



Рис 4.4. Фотографии ПЧЭ, используемых в серийных датчиках МИДА (*a*), и с оптимизированной топологией для уменьшения температурного дрейфа нулевого сигнала ТП (*б*).



Рис 4.5. Распределение величин температурных дрейфов нулевого выходного сигнала ТП в диапазоне температур -40..+80 °С для серийных ТП МИДА со старой (МД-007) и измененной (МД-010) топологией ПЧЭ на разные диапазоны измерения (планки показывают на разброс относительно среднего значения).

ПЧЭ с оптимизированной топологией МД-010 был внедрён в серийное производство ТП и датчиков давления МИДА. На Рис 4.5. представлены статистические данные по величине температурных дрейфов нулевых сигналов ТП МИДА с разными ПЧЭ. Из сравнения данных для ТП с ПЧЭ МД-007 и МД-010 можно сказать, что благодаря внедрению в производство датчиков ПЧЭ с топологией МД-010 удалось снизить температурный дрейф нулевых сигналов ТП в 2-3 раза.

### 4.3. Разработка ПЧЭ с топологией из сонаправленных ТР.

Проектирование топологии ПЧЭ для ТП мембранного типа достаточно хорошо излагается в [32]. В кремниевых ТП давления с мембранными УЭ обычно используются ПЧЭ с тензорезисторами, расположенными на периферии плоской мембраны и ориентированными вдоль и поперёк радиуса УЭ, что обеспечивает разные знаки изменения сопротивления ТР при подаче давления (см. Рис 4.4). При этом ТР лежат в кристаллографической плоскости (100) кремния и ориентированы по кристаллографическим направлениям <110>, что обеспечивает максимальную чувствительность ТП [62]. Аналогичное размещение ТР на УЭ практикуется и в ТП на основе структур КНС. Топология ПЧЭ (Рис 4.4.*a*), используемая в ТП МИДА, представляет собой полную мостовую схему, в смежные плечи которого включены радиальные и тангенциальные тензорезисторы, ориентированные кристаллографического направления [110] вдоль И имеющие противоположные знаки приращения сопротивления при нагружении. Данный ПЧЭ обладает высокой чувствительностью к измеряемому давлению и универсальностью в использовании: один и тот же ПЧЭ применяется применяется в ТП МИДА с рабочим диапазоном измеряемых давлений от 4 кПа до 200 МПа.

В двухмембранных ТП (Рис 2.9) мембрана с ПЧЭ нагружается не давлением, а сосредоточенной в центре силой. Типичное распределение относительных изменений сопротивления ТР на поверхности таких мембран показано на Рис 4.6. Такое распределение дает возможность [63]



Рис 4.6. Распределение относительного изменения сопротивления радиальных (1) и тангенциальных (2) тензорезисторов по радиусу УЭ двухмембранных ТП (стрелкой указаны расстояния  $r_1$  и  $r_0$ ).

проектировать ПЧЭ с тензосхемой, состоящей из ТР, расположенных на границе жесткого центра и на периферии мембраны и ориентированных либо только параллельно, либо только перпендикулярно относительно радиуса УЭ. Назовем такие ТР сонаправленными. Как было показано, если тензосхема состоит из радиальных и тангенциальных ТР, то относительная чувствительность ТП будет определяться по формуле (22). В случае использования одних сонаправленных ТР, при условии равенства начальных значений сопротивлений ТР, расположенных у края жесткого центра и на периферии мембраны ( $R_{r_1}|_{P=0} = R_{r_0}|_{P=0} = R$  – мост сбалансирован при отсутствии давления P), относительная чувствительность ТП для двух возможных вариантов топологии ПЧЭ будет определяться по аналогичным формулам:

$$\delta_r = \left(\Delta R_{r_{r_1}}/R - \Delta R_{r_{r_0}}/R\right)/2 \tag{30}$$

$$\delta_t = \left( \Delta R_{t_{ro}} / R - \Delta R_{t_{r1}} / R \right) / 2 , \qquad (31)$$

где  $\delta_r$  и  $\delta_t$  – относительная чувствительность ТП при радиально-радиальной и тангенциально-тангенциальной ориентации ТР у жесткого центра и на периферии мембраны соответственно.

В работе были исследованы двухмембранные ТП с ПЧЭ, имеющими мостовые тензосхемы с ТР, ориентированными радиально и тангенциально к радиусу УЭ и расположенными на периферии мембраны; с радиальнорадиальными ТР, расположенными у жесткого центра и на периферии мембраны и с тангенциально-тангенциальными ТР, также расположенными у жесткого центра и периферии мембраны. На рис 4.7 показаны значения величин  $\delta$ ,  $\delta_r$  и  $\delta_t$ , рассчитанные по результатам измерений ТП с тестовыми ПЧЭ для разных конструктивных параметров мембран. Из этих данных видно, что относительная чувствительность ТП с тензосхемой из одних радиальных TP достаточно близка к чувствительности TП с тензосхемой из радиальных и тангенциальных TP. А вот при использовании одних



Рис 4.7. Зависимость относительной чувствительности ТП от толщины мембраны для трех типов исполнения тензосхемы при  $r_1/r_0=0,34$  (*a*) и  $r_1/r_0=0,45$  (*б*).

тангенциальных резисторов относительная чувствительность ТП ниже по сравнению с другими ТП. Видно также, что величины  $\delta_r$  и  $\delta_t$  зависят от мембраны *h*: при мембраны толщины уменьшении толщины чувствительность возрастает, причем чем меньше отношение  $r_1/r_0$ , тем сильнее эта зависимость. Из приведенных данных следует, что радиальные резисторы можно использовать в тензосхеме, состоящей из ОДНИХ сонаправленных ТР, не снижая чувствительность ТП по сравнению с ныне существующей. Естественно, при этом температурный дрейф нулевого сигнала будет определяться уже не разностью ТКС радиальных и тангенциальных ТР  $\Delta \alpha_R$ , а разностью ТКС резисторов, расположенных на жестком центре и на периферии мембраны:

 $\Delta \alpha_{R_r} = (\alpha_{R_{r1}} - \alpha_{R_{r0}})$ , в случае использования одних радиальных ТР (32)  $\Delta \alpha_{R_t} = (\alpha_{R_{t0}} - \alpha_{R_{t1}})$ , в случае использования одних тангенциальных ТР (33)

О величинах разностей ТКС  $\Delta \alpha_{R_r}$  и  $\Delta \alpha_{R_t}$  можно судить по Рис 4.8, на котором приведены типичные зависимости распределения ТКС радиальных и тангенциальных ТР по поверхности УЭ для двухмембранных ТП. Как видно



Рис 4.8. Типичное для двухмембранных ТП распределение ТКС радиальных и тангенциальных ТР на поверхности УЭ. Стрелками указаны положение ТР радиальнотангенциальной (1) и места расположения ТР радиально-радиальных (2) и тангенциальнотангенциальных (3) тензосхем и соответствующие этим положениям величины Δб<sub>R</sub>, Δα<sub>Rr</sub> и Δα<sub>Rt</sub>.

из рисунка, двухмембранные ТП с тензосхемой из сонаправленных ТР, расположенных на жестком центре и на периферии мембраны имеют примерно в два раза меньшую разность ТКС, чем ТП с тензосхемой из радиальных и тангенциальных ТР, расположенных только на периферии мембраны. Соответственно, температурный дрейф нулевого сигнала ТП при использовании тензосхемы, состоящей только из сонаправленных ТР, должен снизиться примерно вдвое.

За основу для разработки топологии ПЧЭ с сонаправленными ТР был серийный ПЧЭ МД-007 радиально-тангенциальными с TP, взят используемый в ЗАО МИДАУС (Рис 4.4.а). Поскольку с точки зрения получения максимального выходного сигнала В тензосхеме С сонаправленными ТР предпочтительнее использовать радиальные ТР, в новом ПЧЭ МД-009 вместо тангенциальных резисторов, используемых в ПЧЭ с топологией МД-007, были введены радиальные ТР, размещенные на краю жесткого центра (Рис 4.9.а). Для сравнения метрологических

94

Р <sub>изм</sub> , МПа	ПЧЭ	№ ТП	чувствительность, мB/5B	нелинейность, %	вариация, %	гистерезис, %	темп. дрейф нуля, мВ/120°С
0,6	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
	МД-007	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

Таблица 4.2. Метрологические характеристики ТП с ПЧЭ с радиально-тангенциальными (МД-007) и радиально-радиальными (МД-009) тензорезисторами.

характеристик была изготовлена опытная партия ТП с ПЧЭ МД-009 и с МД-007. Технология изготовления ТП и используемые материалы были одинаковыми. Данные испытаний приведены в таблице 4.2. Как видно из приведенных данных, ТП с ПЧЭ МД-009 обладают как достоинствами, так и недостатками по сравнению со стандартными ТП. В частности, ТП с ПЧЭ МД-009 имеют меньший температурный дрейф нулевого сигнала, но при этом у представленных приборов нагрузочная характеристика более нелинейная, чем у ТП с ПЧЭ МД-007. Впрочем, для датчиков с микропроцессорной обработкой сигнала нелинейность выходного сигнала



Рис 4.9. Фотографии ПЧЭ с радиально-радиальной топологией тензосхемы для ТП двухмембранного конструктива (*a*), и для ТП балочного конструктива (*б*).

ТП не составляет большой проблемы, так что можно сказать, что ПЧЭ с радиально-радиальной топологией вполне имеет право на жизнь. К тому же при использовании в мостовой схеме тензорезисторов, размещенных на краю периферии жесткого центра И мембраны, появляется возможность проектирования ПЧЭ с меньшими геометрическими размерами, чем ПЧЭ с TP, тензосхемой, составленной ИЗ радиальных И тангенциальных размещенных только на периферии мембраны.

Основываясь результатах экспериментального на исследования распределения изменения сопротивления и ТКС тензорезисторов а также математического моделирования характеристик ТП был спроектирован ПЧЭ МД-012 с радиально-радиальными тензорезисторами (Рис 4.9.6). Такой ПЧЭ обладает рядом преимуществ по сравнению с ПЧЭ МД-007. За счет меньшего размера ПЧЭ на одной сапфировой пластине размещается большее количество ПЧЭ, что снижает себестоимость их изготовления. Более узкая прямоугольная форма позволяет размещать его на упругом элементе в виде балки, получаемого из круглой мембраны двумя параллельными пропилами (см. Рис 4.10.*a*), что в свою очередь, как будет показано далее, дает выигрыш в величине чувствительности выходного сигнала за счет меньшей жесткости такой балки с мембраной. К ПО сравнению тому же, согласно вышеприведенным данным (см. Рис 4.8), на таком ПЧЭ должен наблюдаться меньший температурный дрейф нулевого сигнала. Для экспериментального исследования метрологических характеристик были изготовлены опытные ТП с ПЧЭ МД-012. В силу того, что по технологии изготовления пропилы для получения балочного УЭ элемента (см. Рис 4.10.*a*) выполняются после пайки ПЧЭ, была возможность исследовать еще ТП с ПЧЭ МД-012 на УЭ в виде мембраны чашечного типа (см. Рис 4.10.6). Результаты измерений приведены в таблице 4.3. Как видно из табличных данных, ТП на ПЧЭ с топологией МД-012 по метрологическим характеристикам ничем не хуже ТП на ПЧЭ с топологией МД-007. При этом у ТП балочного типа с ПЧЭ МД-012



1 – ПЧЭ с кремниевой тензочувствительной схемой;

2-УЭ; 3-коллектор;

4 – приемная мембрана; 5 – соединительный шток.

Таблица 4.3. Метрологические характеристики ТП мембранного типа с ПЧЭ с радиальнотангенциальными ТР (МД-007) и ТП балочного типа с ПЧЭ радиально-радиальными (МД-012) ТР.

Р <sub>изм</sub> , кПа	ПЧЭ	УЭ	№ ТП	чувствительность, мB/5B	нелинейность, %	вариация, %	гистерезис, %	темп. дрейф нуля, мB/120°C
10	МД-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
		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
	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

97

выше чувствительность в 1.5 раза, чем у приборов других конструкций, что позволяет снизить нижний предел измеряемых давлений.

### Выводы к главе 4.

- 1. Проведена ТΠ оптимизация конструкции путем размещения максимальной разницы радиальной тензорезисторов В зоне И тангенциальной составляющих деформаций, определенной по результатам расчета напряженно-деформированного состояния ТП на основе численной модели апробированной в работе. Это позволило при сохранении чувствительности уменьшить нелинейность преобразования, вариацию и гистерезис (особенно для ТП на большие давления от 40 до 160 MПа).
- Предложена новая оптимизированная топология ПЧЭ со смещенными к центру мембраны тензорезисторами, что позволило при сохранении метрологических характеристик вдвое уменьшить аддитивную погрешность ТП (температурный дрейф нулевого сигнала).
- 3. Предложен ПЧЭ с тензосхемой, состоящей из ТР, расположенных на границе жесткого центра и на периферии мембраны и ориентированных либо только параллельно, либо только перпендикулярно относительно УЭ TP). радиуса (сонаправленные Использование ПЧЭ С сонаправленными радиально-радиальными ТР (МД-009) позволяет дополнительно снизить аддитивную погрешность двухмембранных ТП (за счет в два раза меньшей разности ТКС у используемых ТР), без изменения остальных метрологических характеристик.
- 4. Разработана конструкция балочного ТП с узким ПЧЭ с радиальнорадиальными ТР (МД-012), 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.

 Результаты оптимизации существующих и разработки новых конструкций ТП и ПЧЭ внедрены в производство серийно выпускаемых ЗАО МИДАУС датчиков давления МИДА-13 и МИДА-15:

- оптимизированные конструкции ТП с размещением тензорезисторов в зоне максимальных деформаций мембраны (Приложение №3);

- оптимизированная топология ПЧЭ со смещенными к центру мембраны тензорезисторами – МД-010 (Приложение №4);

Полученные решения позволили снизить нелинейность датчиков в (1.2-1.6) раза до величины менее 0.1%, вариацию в (3-7) раз до величины менее 0.05%, температурный дрейф нулевого сигнала в (2.5-3) раза до величины менее (1.5-2)%.

#### Заключение:

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой выполнен комплекс теоретико-экспериментальных исследований процесса разработки мембранных тензопреобразователей давления и в соответствии с поставленными целями и задачами получены следующие новые научные и практические результаты:

- 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, что широко используемое аналитическое описание распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента чашечного типа в тензопреобразователях давления не соответствует действительности, особенно при больших значениях отношения толщины мембраны к её диаметру. Хотя экспериментальные результаты получены на ТП с 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 расчётных значений профилей изменения сопротивления ТР с экспериментом необходимо при расчёте учитывать не только параметры мембранного упругого элемента, но и конструкцию тензопреобразователя давления в целом.
- 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.
- 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 внедрёны в серийное производство тензопреобразователей и датчиков давления в Промышленной группе МИДА.

### Список использованной литературы:

- Мокров, Е.А. Состояние, проблемы и пути развития датчикостроения на 2006-2015 гг / Е.А. Мокров // Электронные компоненты. – 2007. - №3. – С.64-71.
- Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден: пер. Ю.А. Заболотной под редакцией Е.Л. Свинцова. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
- Лебедев, Д.В. О выборе физических принципов измерения давления / Д.В. Лебедев // Датчики и системы. – 2007. – №6. – С. 25-27.
- Мокров, Е.А. Совершенствование тензорезисторных тонкопленочных датчиков давления / Е.А. Мокров, Д.В. Лебедев, В.П. Базаев, Е.В. Ефремов, И.А. Семина, П.А. Колчин // Мир измерений. – 2008. – №4. – С. 41-46.
- Игнатьева, Е.В. Влияние конструкции мембраны на параметры выходной характеристики кремниевого тензопреобразователя давления / Е.В. Игнатьева, Ю.А. Михайлов, В.В. Панков // Датчики и системы. – 2009. – №6. – С. 51-54.
- Барулина, М.А. Миниатюрный датчик давления для мониторинга и диагностики ракетно-космической техники в условиях механических и тепловых воздействий / М.А. Барулина, В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – №6. – С. 26-29.
- Официальный сайт ОАО НИИФИ Режим доступа : http://www.niifi.ru, свободный. – Яз. рус..
- 8. Патент 2480723. Датчик давления основе на нано-И микроэлектромеханической повышенной системы точности И надежности / В.А. Васильев, Д.М. Хованов – 2012108345/28; заявл. 05.03.2012 ; опубл. 27.04.2013, Бюл. – №12. – 12 с. : ил.

- Крошкин, А.Н. Новое поколение датчиков оптимальное сочетание цены и качества / А.Н. Крошкин, К.Р. Заргарьян, С.В. Олейник // автоматизация в промышленности. – 2006. – №6. – С. 59-63.
- 10. Официальный сайт BD Sensors GmbH Режим доступа : http://www.bdsensors.de, свободный. Яз. нем..
- Kurtz, Anthony D.. Ultra high temperature, miniature, SOI sensors for extreme environments / A.D. Kurz, A.N. Alexander, H.E. Alan // IMAPS Internationale HiTEC 2004 Conference, Santa Fe, New Mexico, May 17-20, 2004
- Мишанин, А. Полупроводниковые чувствительные элементы датчиков давлений на основе наноструктурированного поликристаллического кремния / А. Мишанин, А. Родионов, С. Козин, И. Баринов // Компоненты и технологии. – 2009. - №9. – С. 29-32.
- Гусев, Д.В. Микроэлектронные преобразователи давления для средств регулирования и мониторинга технологических процессов в энергосберегающих системах / Д.В. Гусев, Н.Л. Данилова, В.В. Панков, В.С. Суханов // Датчики и системы. – 2011. – №4. – С. 49-52.
- 14. Официальный сайт Keller Group GmbH Режим доступа : http://www.keller-druck.com, свободный. – Яз. нем..
- 15. Официальный сайт Kulite Semiconductor Inc Режим доступа : http://www.kulite.com, свободный. Яз. англ..
- Папков, В.С. Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе / В.С. Папков, М.Б. Цыбульников. – М. : Энергия, 1979. – 89 с.
- 17. Стучебников, В.М. Тензорезисторные преобразователи на основе «кремний сапфире» гетероэпитаксиальных структур на B.M. / автоматизация: Стучебников // Измерение, контроль, научнотехнический сборник. 1982. – №4, С. 15-26.
- 18. Официальный сайт ESI Technology Ltd Режим доступа : http://www.esitec.com, свободный. – Яз. англ..

- 19. Официальный сайт ЗАО НПК ВИП Режим доступа : http://www.zaovip.ru, свободный. – Яз. рус..
- 20. Официальный сайт ЗАО МИДАУС Режим доступа : http://www.midaus.com, свободный. – Яз. рус..
- Козлов, Ю.Ф. Структуры кремния на сапфире: технология, свойства, методы контроля, применение : учеб. пособие / Ю.Ф. Козлов, В.В. Зотов; М-во образования и науки РФ, Моск. гос. Ин-т электрон. техники (техн. ун-т). – М. : МИЭТ, 2004. – 139 с. : ил.
- Белоглазов, А.В. Полупроводниковые тензопреобразователи силы и давления на основе гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире" / А.В. Белоглазов, В.М. Стучебников, В.В. Хасиков, В.И. Евдокимов, А.Г. Шатдина // Приборы и системы управления. 1982. №5. С. 21-23.
- Кенигсберг, В.Л. Комплекс полупроводниковых тензорезисторных измерительных преобразователей "Сапфир" / В.Л. Кенигсберг, В.М. Стучебников, В.И. Сердюков, В.И. Евдокимов, В.К. Суходолец, С.И. Мильман // Измерительная техника. 1978. №10. С. 84-86.
- 24. Евдокимов, В.И. Модернизированные тензорезисторные преобразователи для датчиков "Сапфир 22-М" / В.И. Евдокимов, Г.И. Лурье, В.И. Суханов, В.И. Белоглазов // Приборы и системы управления. 1990. №11. С. 27-29.
- 25. Бушуев, Н.А. Высокоточные датчики давления высокотемпературных сред / Н.А. Бушуев, Д.Б. Мартынов, О.Л. Николайчук, В.М. Стучебников // Сб. док. международной научно-технической конференции "Датчики и Системы -2005". Пенза : Изд-во НИИФИ, 2005. С. 52-55.
- Бушев, Е.Е. Серия общепромышленных датчиков давления МИДА-13П / Е.Е. Бушев, О.Л. Николайчук, В.М. Стучебников // Датчики и системы. 2004. №6. С. 48-51.
- Официальный сайт ПГ МЕТРАН Режим доступа : http://www.metran.ru, свободный. – Яз. рус..

- 28. Стучебников, В.М. Разработка и исследование оптимизированных интегральных чувствительных элементов тензопреобразователей механических величин : дис. ... док. тех. наук. : 05.27.01 / Стучебников Владимир Михайлович. – М. : НИИТеплоприбор, 1985. – 577 с.
- Евдокимов, В.И. Полупроводниковые тензопреобразователи для измерения давления криогенных сред / В.И. Евдокимов, Г.И. Лурье, В.М. Стучебников // Приборы и системы управления. 1985. №8. С. 19-20.
- Коловертнов, Ю.Д. Измерительный преобразователь давления в высокотемпературных скважинах / Ю.Д. Коловертнов, В.И. Суханов, В.М. Стучебников, В.И. Федоров // Приборы и системы управления. – 1990. – №3. – С. 20-23
- Очеретянский, А.Л. Сравнение влияния облучения на электрофизические параметры в сильнолегированных слоях КНС и объемном кремнии / А.Л. Очеретянский, В.М. Стучебников. – М. : МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1988. – С. 133-137.
- 32. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В.И. Ваганов. М.
  : Энергоатомиздат, 1983. 136 с. : ил.
- 33. Евдокимов, В.И. Проектирование мембранных преобразователей / В.И. Евдокимов, А.Г. Шатдина // Полупроводниковые тензорезисторные измерительные преобразователи теплоэнергетических параметров, принципы построения и характеристики : сб. науч. тр. М.; НИИ Теплоприбор, 1983. С. 65-71.
- Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов : учебник для ВУЗов / В.И. Феодосьев. 12-е изд. М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 592 с.
- Андреева, Л.Е. Упругие элементы приборов / Л.Е. Андреева. М. : Машгиз, 1962. – 456с.
- 36. Тимошенко, С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер : пер. В.И. Контовта под редакцией Г.С. Шапиро. М. : Наука, 1966. 592 с. : ил.

- 37. Черницын, В.Н. Исследование распределения деформаций в упругих элементах мембранных тензопреобразователей / В.Н. Черницын // Измерительные преобразователи давления, теоретические и экспериментальные исследования и разработка : сб. науч. тр. – М. : НИИТеплоприбор, 1989. – С. 90-95.
- Shih-Chin Gong. Analytical solutions of sensitivity for pressure microsensors / Shih-Chin Gong and Chengkuo Lee // IEEE SENSORS JOURNAL. December 2001, - Vol. 1, № 4. - pp. 340-344.
- 39. Eaton, William P. A new analytical solutions for diaphragm deflection and its application to a surface-micromachined pressure sensor / W.P. Eaton, F. Bitsie, J.H. Smith, D.W. Plummer // 1999 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems: MSM '99, San Juan : April 19-21, 1999, San Juan Marriott, San Juan, Puerto Rico, USA.
- 40. Белозубов, Е.М. Моделирование деформаций мембран датчиков давления / Е.М. Белозубов, В.А. Васильев, П.С. Чернов // Измерительная техника. 2009. №3. С. 33-36.
- Игнатьева, Е.В. О показателе тензочувствительности кремниевых тензопреобразователей давления / Е.В. Игнатьева, Ю.А. Михайлов // Датчики и системы. – 2008. – №10. – С. 35-37.
- 42. Белозубов, Е.М. Перспективные тонкопленочные тензорезисторные датчики давления для ракетной и авиационной техники / Е.М. Белозубов // Измерительная техника. 2004. №5. С. 37-41.
- 43. Zhang Yan-Hong. A novel pressure Microsensor with 30-µm-thick diaphragm and meander-shaped piezoresistors partially distributed on high-stress bulk silicon region / Yan-Hong Zhang, Chen Yang, Zhao-Hua Zhang, Hui-Wang Lin, Li-Tian Liu, Tian-Ling Ren // IEEE SENSORS JOURNAL. December 2007. – Vol. 7, № 12. – pp. 1742-1748.
- 44. Барулина, М.А. Математическое моделирование датчика давления в условиях механических и тепловых ударов / М.А. Барулина, В.Э.

Джашитов, В.М. Панкратов // Датчики и системы. – 2009. – №8. – С. 37-39.

- 45. Андреев, К.А. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления / К.А. Андреев, Ю.Н. Тиняков, В.А. Шахнов // Датчики и системы. 2013. №9. С. 2-9.
- 46. Хасиков, В.В. Исследование термических деформаций поверхности двухслойной мембраны преобразователя давления / В.В. Хасиков, В.И. Суханов, Н.Б. Резникова // Приборы и системы управления. 1995. №9. С. 12-15.
- 47. Стучебников, В.М. Кремний на сапфире как материал для тензопреобразователей механических величин / В.М. Стучебников // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. №6. С. 678-696.
- 48. Терстон, Р. Применение полупроводниковых преобразователей для измерения деформаций, ускорений и смещений / Р. Терстон // Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований : под ред. У. Мэзона. – М. : Мир, 1967. – Т.1. – Ч. Б. – 362 с.
- 49. Moiseyev, V.N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications / V.N. Moiseyev. NewYork: Taylor&Francis, 2006. 207 s.
- Масленников, С.Б. Стали и сплавы для высоких температур : справочник
   / С.Б. Масленников, Е.А. Масленникова. в 2 кн. : справочное издание. М. : Металлургия, 1991. – Кн. 2. – 387-831 с.
- Dobrovinskaya, E.R. Sapphire: Material, Manufacturing, Applications Springer / E.R. Dobrovinskaya, L.A. Lytvynov, V. Pishchik. – NewYork: Springer, 2009. – 481 s.
- 52. Tefft, W.E. Elastic constants of synthetic single crystal corundum / W.E. Tefft
   J.Res.NBS, 1966. Vol. 70A, № 4. p.277-280.
- 53. Най, Дж. Физические свойства кристаллов / Дж. Най : пер. с англ. Л.А. Шувалова. М. : Издательство иностранной литературы, 1960 г.
- 54. Физические величины: справочник / А.П. Бабичев [и др.] : под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М. : Энергоатомиздат, 1991.

- 55. Мячников, В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов / В.И. Мячников [и др.] : под. ред. В.И. Мячникова. М. : Машиностроение, 1989. 520 с. : ил.
- 56. Баринов, И.Н. Чувствительные элементы микромеханических датчиков давлений. Основы проектирования и разработки : учебное пособие / И.Н. Баринов, В.С. Волков. – Пенза, 2013. – 79 с.
- 57. 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.
- Куликовский, К.Л. Методы и средства измерений: учеб. пособие для вузов / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с. : ил.
- 59. А.с. 1525505 СССР. Тензопреобразователь высокого давления / А.В. Белоглазов, В.И. Евдокимов и др. 4423170/24-10 ; заявл. 10.05.88 ; опубл. 01.08.89, Бюл. №44. 3 с. : ил.
- 60. 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.
- 61. Обработка экспериментальных данных : учеб. пособие / Агапьев Б.Д. [и др.]. СПб. : СПбГТУ, 1999. 83 с. : ил.
- Пивоненков, Б.И. Проектирование полупроводниковых интегральных тензочувствительных структур / Б.И. Пивоненков, В.М. Стучебников // Приборы и системы управления. – 1976. – №1. – С. 20-21
- 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.
- 64. Металлы и сплавы : справочник / В. К. Афонин, Б. С. Ермаков, Е. Л. Лебедев и др; Под ред. Ю. П. Солнцева. СПб. : Профессионал ; СПб. : Мир и Семья, 2003. 1066 с. : ил. (Профессионал). Библиогр. в конце глав.
## Марка и химический состав (%) деформируемых титановых сплавов (ГОСТ 19807-91) [64].

Обозначения марок	Ti	Al	V	Мо	Sn	Zr	Mn	Cr	Si	Fe	0	Н	N	С
BT1-00	Основа	-	-	-	-	-	-	-	0,08	0,15	0,10	0,008	0,04	0,05
BT1-0	То же	-	-	-	-	-	-	-	0,10	0,25	0,20	0,010	0,04	0,07
BT1-2	То же	-	-	-	-	-	-	-	0,15	1,5	0,30	0,010	0,15	0,10
OT4-0	То же	0,4- 1,4	-	-	-	0,30	0,5- 1,3	-	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
OT4-1	То же	1,5- 2,5	-	-	-	0,30	0,7- 2,0	-	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
OT4	То же	3,5- 5,0	-	-	-	0,30	0,8- 2,0	-	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
BT5	То же	4,5- 6,2	1,2	0,8	-	0,30	-	-	0,12	0,30	0,20	0,015	0,05	0,10
BT5-1	То же	4,3- 6,0	1,0	-	2,0- 3,0	0,30	-	-	0,12	0,30	0,15	0,012	0,05	0,10
BT6	То же	5,3- 6,8	3,5- 5,3	-	-	0,30	-	-	0,10	0,60	0,20	0,015	0,05	0,10
BT6c	То же	5,3- 6,5	3,5- 4,5	-	-	0,30	-	-	0,15	0,25	0,15	0,015	0,04	0,10
BT8	То же	5,8- 7,0	-	2,8- 3,8	-	0,50	-	-	0,20- 0,40	0,30	0,15	0,015	0,05	0,10
BT9	То же	5,8- 7,0	-	2,8- 3,8	-	1,0- 2,0	-	-	0,20- 0,35	0,25	0,15	0,015	0,05	0,10
BT14	То же	3,5- 6,3	0,9- 1,9	2,5- 3,8	-	0,30	-	-	0,15	0,25	0,15	0,015	0,05	0,10
BT20	То же	5,5- 7,0	0,8- 2,5	0,5- 2,0	-	1,5- 2,5	-	-	0,15	0,25	0,15	0,015	0,05	0,10
BT22	То же	4,4- 5,7	4,0- 5,5	4,0- 5,5	-	0,3	-	0,5- 1,5	0,15	0,5- 1,5	0,18	0,015	0,05	0,10

## Связь радиальных и тангенциальных составляющих тензора деформаций с относительными изменениями сопротивлений тензорезисторов под действием давления.

Для экспериментального определения радиальных и тангенциальных компонентов тензора деформаций воспользуемся формулами, полученными в [28] при расчете чувствительности ПЧЭ на основе структур КНС:

$$\int \frac{\Delta R_r}{R_r} = (m_{11} + m_{12} + 2m_{44})\frac{\varepsilon_r}{2} + (m_{11} + m_{12} - 2m_{44})\frac{\varepsilon_t}{2} - m_{12}v_k(\mathbf{e}_r + \varepsilon_t)$$
(11.1)

$$\left(\frac{\Delta R_t}{R_t} = (m_{11} + m_{12} - 2m_{44})\frac{\varepsilon_r}{2} + (m_{11} + m_{12} + 2m_{44})\frac{\varepsilon_t}{2} - m_{12}v_k(\varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (\pi 1.2)\right)$$

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

Решим систему уравнений (п1.1) и (п1.2) относительно  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_t$ . Для этого сначала преобразуем уравнения (п1.1) и (п1.2).

$$\begin{cases} 2\frac{\Delta R_r}{R_r} = (m_{11} + m_{12}(1 - 2v_k) + 2m_{44})\varepsilon_r + (m_{11} + m_{12}(1 - 2v_k) - 2m_{44})\varepsilon_t & (\pi 1.3) \\ 2\frac{\Delta R_t}{R_t} = (m_{11} + m_{12}(1 - 2v_k) - 2m_{44})\varepsilon_r + (m_{11} + m_{12}(1 - 2v_k) + 2m_{44})\varepsilon_t & (\pi 1.4) \end{cases}$$

Для упрощения дальнейших расчетов введем следующие обозначения:

$$A = (m_{11} + m_{12}(1 - 2v_k) + 2m_{44}) \tag{(11.5)}$$

$$B = (m_{11} + m_{12}(1 - 2v_k) - 2m_{44}) \tag{(11.6)}$$

Система уравнений (п.3) и (п.4) примет следующий вид:

$$\begin{cases} 2\frac{\Delta R_r}{R_r} = A\varepsilon_r + B\varepsilon_t \\ 2\frac{\Delta R_t}{R_t} = B\varepsilon_r + A\varepsilon_t \end{cases}$$
(п1.7)  
(п1.8)

Решая уравнение, получаем:

$$\varepsilon_r = 2 \frac{A \,\Delta R_r / R_r - B \,\Delta R_t / R_t}{A^2 - B^2} \tag{(11.9)}$$

$$\varepsilon_t = 2 \frac{A \,\Delta R_t / R_t - B \,\Delta R_r / R_r}{A^2 - B^2} \tag{(11.10)}$$

Подставляя в (п1.9) и (п1.10) выражения для *A* и *B* и производя очевидные преобразования, получаем окончательные выражения для экспериментального определения деформаций:

$$\varepsilon_r = \frac{\Delta R_r / R_r + \Delta R_t / R_t}{2m_{11} + 2m_{12}(1 - 2v_k)} + \frac{\Delta R_r / R_r - \Delta R_t / R_t}{4m_{44}} \tag{(11.11)}$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R_r / R_r + \Delta R_t / R_t}{2m_{11} + 2m_{12}(1 - 2v_k)} - \frac{\Delta R_r / R_r - \Delta R_t / R_t}{4m_{44}} \tag{(11.12)}$$

Приложение №3. ТВЕРЖДАЮ ктор ЗАО МИДАУС Бушев Е.Е. OKTEDAS 201 √ г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы А.И. Козлова «Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Впервые полученные Козловым А.И. экспериментальные профили относительных изменений сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) тензорезисторов в широком диапазоне температур (-40..+200 °C) а также распределения деформаций были использованы при проверке адекватности и отладке численной модели тензопреобразвателей (ТП) давления, разработанной в ЗАО МИДАУС.

Использование отлаженной и апробированной численной модели ТП давления позволило оптимизировать конструкции ТП с заданием зоны максимальной разности радиальной и тангенциальной составляющих деформаций мембраны под тензорезисторами, что в свою очередь позволило снизить нелинейность датчиков в (1.2-1.6) раза до величины менее 0.1%, вариацию в (3-7) раз до величины менее 0.05% с сохранением требуемого значения выходного сигнала ТП, а также увеличилось значение давления разрушения до 7-10 раз.

В результате в номенклатуре продукции ЗАО МИДАУС появились датчики класса точности 0,2% и 0,15%. По заказу фирмы DH Budenberg (Франция) были разработаны ТП с суммарной погрешностью (вариация+гистерезис+повторяемость), не превышающей 0,05% и 0,01%, используемых для построения высокоточных калибраторов давления.

Начальник отделения разработок

(В.В. Алашеев)

Приложение №4.

**УТВЕРЖДАЮ** Директор ЗАО МИДАУС Бушев Е.Е. 201 У г.

АКТ

о внедрении оптимизированных полупроводниковых чувствительных элементов на основе структур «кремний на сапфире» с топологией из смещенных к центру мембраны тензорезисторов в ЗАО МИДАУС

Оптимизированные полупроводниковые чувствительные элементы (ПЧЭ) мембранного типа на основе структур "кремний на сапфире" (КНС), разработанные в ЗАО МИДАУС на основании исследований Козлова А.И., внедрены в ЗАО МИДАУС в разработанных и освоенных в производстве датчиков давления МИДА-13 и МИДА-15, начиная с 2010 г.

Использование ПЧЭ с оптимизированной топологией позволило снизить температурный дрейф нулевого сигнала в (2.5-3) раза до величины менее (1.5-2)%, а также увеличить величину пробивного напряжения с 650 В до 800 В.

Объем выпуска датчиков только в прошлых 2010 - 2013 годах составил 56,7 тыс. шт.

Начальник производства

(С.Б. Никитин)