

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет
информационных технологий
и электроники
наименование факультета

Кафедра
Нано – и микроэлектроника
наименование кафедры

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и наноэлектроника»
код и наименование

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника
наименование профиля

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

ПензГУ 02. 11.03.04. 015 ПЗ
обозначение, присваиваемое кафедрой

на тему

Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений
тема бакалаврской работы

Студент группы 20ПД1
номер группы

[подпись] 10.06.24
подпись, дата

Филатов Е.С.
фамилия, инициалы

Руководитель профессор
должность

[подпись] 10.06.24
подпись, дата

Цыпин Б.В.
фамилия, инициалы

ПГУ, кафедра «РКАП»
наименование организации

Нормоконтролер ст. преподаватель [подпись] 17.06.24 Рыжова Т.Н.
должность подпись, дата фамилия, инициалы

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 10.06.24 № 10)

Заведующий кафедрой

[подпись] 10.06.24
подпись, дата

Пронин И.А.
фамилия, инициалы

Работа защищена с оценкой удовл. (протокол ГЭК от 26.06.24 № 9)

Секретарь ГЭК

[подпись] 26.06.24
подпись, дата

Вольсков А.А.
фамилия, инициалы

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка состоит из страниц, 4 рисунков, 4 таблиц, списка использованных источников из 17 наименований и 6-ти приложений.

Ключевые слова: датчик, чувствительный элемент, упругий элемент, давление, тензорезистор, номинальное сопротивление, тонкопленочная структура, воспринимающая мембрана, меандр.

Цель: разработать датчик малых абсолютных давления на основе модернизации и проектирования чувствительного элемента.

Задачи:

1. Провести исследование тонкопленочных датчиков абсолютного давления.

Назначение — измерение абсолютного давления жидких и газообразных агрессивных и неагрессивных сред и преобразование его в электрический сигнал

2. Разработать датчик малых абсолютных давлений на основе модернизации чувствительного элемента

Параметры разработки:

— Проектирование тензорезистора формы меандр с заданным номинальным сопротивлением $R = 750 \pm 50$ Ом;

— Расчет топологии чувствительного элемента с применением спроектированных ранее тензорезисторов.

Актуальность данной темы заключается в том, что в составе многих современной электроники используются датчики. Датчики давления же применяются во многих сферах государственной важности, например в таких как ракетостроение и самолетостроение. Также современные изделия микроэлектронной техники довольно трудоемкий и сложный процесс, вследствие чего цена такого продукта относительно высокая. Разработка новых датчиков давления поможет одновременно и удешевить их, и улучшить их параметры и качества.

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						2
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Объект исследования: датчики малых абсолютных давлений.

Предмет исследования: чувствительный элемент датчиков малых абсолютных давлений.

Полученные результаты: топология чувствительного элемента датчика малых абсолютных давлений с четырьмя полумостами по два тензорезистора типа меандр каждый, позволяющая разработать новый датчик на основе старых.

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Общие сведения о датчиках давления и датчко-преобразующей аппаратуре	5
1.1 Принцип работы и область применения датчиков давления	5
1.2 Классификация датчиков и датчко-преобразующей аппаратуры.....	8
1.3 Требования к датчикам давления и критерии их выбора.....	13
2 Материалы и принципы изготовления чувствительных элементов датчиков давления.....	18
2.1 Основные конструктивно-технологические принципы изготовления чувствительных элементов.....	18
2.2 Выбор материалов чувствительного элемента.....	21
3 Модернизация чувствительного элемента датчика абсолютного давления.....	26
3.1 Расчет тензорезистора типа меандр.....	26
3.2 Разработка топологии измерительной мостовой схемы.....	31
4 Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории.....	33
4.1 Расчет освещенности лаборатории по проектированию датчиков давления.....	33
Заключение.....	37
Список использованных источников.....	38
Приложение А. Задание на выпускную квалификационную работу.....	40
Приложение Б. Расчет размеров тензорезистора типа меандр в среде программирования <i>MathCad</i>	44
Приложение В. Маршрутная карта на разработку чувствительного элемента датчика абсолютного давления.....	46
Приложение Г. Топология чувствительного элемента датчика давления.....	49
Приложение Д. Презентация ВКР.....	55
Приложение Е. Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе «Антиплагиат. ВУЗ».....	72

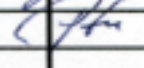
ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы неэлектрические величины можно было измерить с помощью электрических методов, необходимы устройства, которые преобразовывали бы измеряемую неэлектрическую величину в некоторую промежуточную величину, а затем в окончательный результат измерения в виде электрической величины. Устройства, осуществляющие однозначную функциональную зависимость одной неэлектрической величины от другой, называются измерительными преобразователями.

Преобразователи бывают четырех видов:

- а) преобразователи вида энергии — преобразовывают неэлектрические величины в электрические;
- б) неэлектрические преобразователи — преобразовывают одни неэлектрические величины в другие, так же неэлектрические;
- в) электрические преобразователи — преобразовывают одни электрические величины в другие, так же электрические;
- г) обратные преобразователи — преобразовывают электрические величины в неэлектрические.

Датчики — часть измерительной информационной системы (ИИС), представляющая собой конструктивную совокупность измерительных преобразователей, включающую преобразователь вида энергии сигнала, размещенную в зоне действия влияющих факторов объекта и воспринимающую естественно закодированную информацию от данного объекта. Остальные звенья ИИС, такие как измерительное устройство и указатель (регистратор), стало возможно с развитием микроэлектроники располагать непосредственно в датчике, при этом подобные датчики имеют ограничения диапазонов влияющих факторов.

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Филатов					
Провер.		Цыпин					
Реценз.							
Н. Контр.		Рыжова		17.06.24			
Утверд.							

Введение

Лит.	Лист	Листов
	5	

гр. 20ПД1

Таким образом, отличительной чертой датчика являются два фактора:

а) датчик располагается в зоне действия влияющих факторов объекта измерения;

б) датчик обязан включать в себя преобразователь вида энергии сигнала.

В настоящее время датчики механических величин являются неотъемлемой частью преобладающего большинства технических устройств.

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 Общие сведения о датчиках давления и датчко-преобразующей аппаратуре

1.1 Принцип работы и область применения датчиков давления

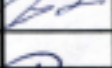
Датчики давления измеряют физические изменения, которые происходят как реакция на разницу давления. После измерения этих физических изменений информация преобразуется в электрические сигналы. Затем эти сигналы могут быть отображены в виде полезных данных, которые команда может интерпретировать.

Пример этого процесса будет работать в следующих шагах:

1. В конструкции датчиков, как и остальных измерительных преобразователей, используется чувствительный элемент (ЧЭ). ЧЭ преобразует усилие, возникающее в результате внешнего воздействия, регистрируя тем самым изменения внешних физических параметров, таких как давление, сила, вес и другие. Упругий элемент (УЭ), являющийся составной частью ЧЭ или отдельным элементом, обычно изготавливается из материала, обладающего упругостью, то есть свойством деформироваться под воздействием внешних нагрузок и после прекращения нагрузки возвращаться к исходной форме. Датчик измеряет и калибрует физические деформации УЭ, чтобы показать, какое давление оказывается на оборудование или резервуар. Затем он преобразует эти изменения в напряжения или электрические сигналы.

2. Как только датчик выдает электрический сигнал, устройство может записать показания давления. Интенсивность этих сигналов возрастает или уменьшается в зависимости от давления, ощущаемого датчиком. В зависимости от частоты сигнала показания давления могут выполняться между очень близкими временными интервалами.

3. Электрические сигналы теперь представлены в виде показаний

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Филатов			Лит.		
Провер.		Цыпин			Лист		
Реценз.					Листов		
Н. Контр.		Рыжова		17.08.24	7		
Утверд.					гр. 20ПД1		

Общие сведения о датчиках давления и датчко-преобразующей аппаратуре

давления в паскалях или в фунты на квадратный дюйм (*psi*) для имперской системы измерения. Датчики отправляют показания в режиме реального времени. Благодаря множеству датчиков, установленных на различных объектах, компьютеризированная система управления техническим обслуживанием выступает в качестве центрального узла для отслеживания всего объекта.

4. Благодаря установленным датчикам специалисты по техническому обслуживанию получают оповещения о слишком высоком или слишком низком давлении. Слишком высокое номинальное давление может указывать на риск разрыва деталей или на вероятность повреждения оборудования. С другой стороны, потеря давления может быть признаком утечки, особенно на сосудах под давлением. Данные в режиме реального времени в сочетании с мобильными функциями дают вашей команде представление о состоянии объекта в любое время.

Вследствие многообразия датчиков давления, доступных на рынке, появляется широкий спектр их применений. Датчики давления нашли широкое применение в авиационно-космической отрасли, конкретнее при конструировании реактивных двигателей. Также датчики давления могут применяться в гидравлических и пневматических системах на производствах. В вакуумных технологиях, которые являются основой многих передовых промышленных и научных процессов, не обойтись без датчиков давления. У датчиков давления есть множество и других направлений применения, таким образом выводя их на одну из важнейших позиций при создании подавляющего большинства объектов, окружающих человека в настоящее время.

Основными техническими характеристиками датчико-преобразующей аппаратуры являются диапазон измерений, напряжение питания постоянного тока, выходной сигнал, основная погрешность, вибрация, рабочий диапазон температур, суммарная наработка, срок службы, вероятность безотказной работы и масса.

1.2 Классификация датчиков и датчико-преобразующей аппаратуры

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В каждом измерительном преобразователе происходит преобразование физической величины в соответствии с конкретным физическим явлением (закономерностью, эффектом, законом).

Датчико-преобразующая аппаратура (ДПА) является устройствами, предназначенными для измерения различных параметров среды, а впоследствии преобразования и передачи полученной информации. ДПА широко применяется в различных отраслях промышленности, научных исследованиях, медицине и других областях.

Классификация ДПА может быть основана на различных критериях, таких как тип контролируемого параметра, принцип работы, метод преобразования информации и другие. Основная классификация по типу контролируемого параметра приведена в таблице 1.

Таблица 1 — Классификация ДПА по типу контролируемого параметра

Тип датчика	Тип контролируемого параметра
1	2
Датчики давления	Давление жидких и газообразных сред
Акселерометры	Ускорения и упругие колебания
Датчики температуры	Температура
Датчики перемещения (движения)	Перемещение объекта
Датчики акустики	Звуковые давления
Датчики пульсации	Пульсации давления
Датчики оборотов	Число оборотов объекта
Датчики силы и тензорезисторы	Статико-динамические деформации, усилия (такие как растяжение и сжатие)

Продолжение таблицы 1

1	2
Датчики тока	Ток
Переключатели	Контроль положения объекта

Один из критериев классификации датчиков — по типу упругого элемента. Датчики давления делят по типу УЭ на металлопленочные, кремниевые и индуктивные.

Датчики давления можно классифицировать в соответствии с методом, с помощью которого они обнаруживают изменения давления. Датчики могут наблюдать и измерять различные физические реакции. Ниже перечислены некоторые из наиболее распространенных типов датчиков давления:

1. Тензорезистивные датчики. Деформация определяется как пропорциональное расширение или сжатие материалов, когда объект прикладывает силу. Тензодатчики, как следует из названия, используют эти ощутимые изменения размеров пружины для измерения давления. Их конструкция построена на тензорезисторах, формирующих собой тензометрический мост (тензомост). Тензорезистивные датчики имеют пружинный элемент, который деформируется при приложении силы. Электрическое сопротивление материала пропорционально изменяется по мере изменения его структуры. При изменении давления колебания сопротивления и показания напряжения принимаются за электрические сигналы. Затем они калибруются в соответствии с эквивалентными показаниями давления и отображаются датчиком. Тензисторические датчики особенно удобны для задач долгосрочного мониторинга. Они являются наиболее часто используемым типом датчиков из-за их доступности и универсальности.

Упрощенная электрическая принципиальная схема тензомоста изображена на рисунке 1.

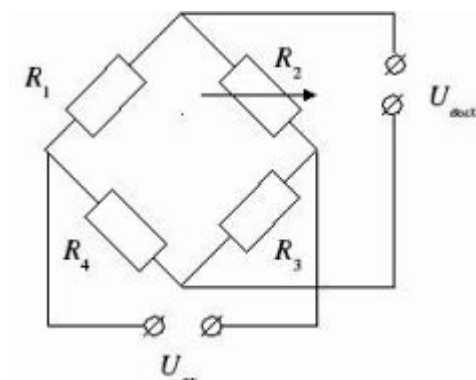


Рисунок 1 — Электрическая принципиальная схема тензомоста

2. Пьезоэлектрические датчики. Пьезоэлектрические датчики работают за счет использования пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрический эффект описывает генерацию электрического заряда в ответ на физические изменения материала. Этот эффект более очевиден в определенных материалах до такой степени, что его можно измерить. Создаваемый заряд пропорционален приложенной силе. Датчик может измерять и калибровать изменения заряда и отображать соответствующее измерение давления. Пьезоэлектрические датчики могут иметь очень малые размеры, что делает их хорошим выбором для приложений с ограниченным пространством. Кроме того, они, как правило, допускают высокие частоты при приеме данных. Это является преимуществом для показаний, требующих динамических измерений, выполняемых между точками данных с короткими интервалами.

3. Ёмкостные датчики. Такой датчик может измерять емкость конденсатора, определяя значения емкости, которые изменяются в зависимости от окружающего давления. Области применения емкостных датчиков давления включают измерение изменений давления в реактивных двигателях, автомобильных шинах и других судах. Они имеют простую механическую

конструкцию, которая позволяет им выдерживать суровые условия окружающей среды.

4. Манометры. Самые ранние приборы, используемые для измерения давления, состояли из стеклянных трубок, наполненных жидкостью. Манометры, по сути, представляют собой трубку, которая использует движение жидкости для сравнения давления, испытываемого двумя ее поверхностями. Самые простые манометры имеют *U*-образную форму с жидкостью внутри, которая вытесняется изменяющимися перепадами давления. Манометры можно использовать для калибровки другого оборудования. Они по-прежнему широко распространены в лабораторных условиях. Из-за более медленного отклика и ограниченного диапазона давлений они не подходят для динамических измерений давления.

5. Вакуумметры. Предыдущие датчики давления обычно работают, измеряя усилие, приложенное к механическому устройству. Эти механические методы могут стать более сложными, когда давление ниже атмосферного, особенно при экстремальных уровнях вакуума. При работе с вакуумным давлением измерения в меньшей степени зависят от механических реакций. Вместо этого датчики наблюдают и измеряют влияние на свойства материалов. Наиболее известным датчиком, используемым для измерения вакуумного давления, является датчик Пирани, названный в честь его изобретателя Марчелло Стефано Пирани. Принцип работы датчика Пирани заключается в измерении сопротивления нагретой нити накала в измерительной камере. По мере того, как манометрическая камера подвергается воздействию окружающего вакуумного давления, температура, ощущаемая камерой, падает. Это изменение температуры пропорционально изменяет проводимость в нити накаливания. Затем это можно рассматривать как косвенное измерение испытываемого давления.

6. Трубка Бурдона. В случае предыдущих видов датчиков физические деформации из-за приложенной силы измеряют давление. Трубка Бурдона - это механическое устройство, которое использует физические движения. Он использует окружающую силу для управления циферблатом, который откалиброван для отображения показаний давления. Трубки Бурдона изготавливаются из трубки, свернутой в С-образную форму. Один конец закрыт, а другой открыт измеряемому окружению. По мере увеличения давления, ощущаемого одним концом трубки, катушка пытается выпрямиться. В сочетании со шпинделем это физическое движение катушки перемещает стрелку, показывающую показания давления на стрелочном манометре. Благодаря своей простоте и прочности трубчатые манометры Бурдона обычно недорогие, но долговечные. Они обеспечивают точность при работе с высоким давлением. Однако из-за своей чисто механической природы показания подвержены ударам и вибрации. Не рекомендуется использовать их при низких давлениях, требующих точных измерений.

7. Барометр-анероид. Это еще один тип чисто механического прибора, используемого для измерения давления. Этот прибор имеет герметичный металлический цилиндр, напоминающий капсулу. Эта капсула сжимается и расширяется в ответ на окружающее давление. Эти небольшие различия могут быть измерены и соединены с циферблатом, который затем отображает соответствующие показания давления. Барометры-анероиды обычно используются для измерения атмосферного давления. Они обычно используются в самолетах, благодаря своей прочной и удобной конструкции. Для применения в самолетах они также могут использоваться для измерения высоты на основе изменений атмосферного давления.

1.3 Требования к датчикам давления и критерии их выбора

Условия эксплуатации датчиков давления таковы, что на них кроме давления измеряемой среды могут воздействовать нестационарные температуры с градиентами до сотен градусов, вибрация и удары.

Датчики давления должны соответствовать следующим требованиям:

- а) работоспособность в диапазоне температур измеряемой среды от криогенной до +100 градусов по Цельсию;
- б) стойкость к термоударам и механическим ударам;
- в) минимальное значение погрешности выходного сигнала в условиях воздействия комплекса дестабилизирующих факторов;
- г) стабильность метрологических характеристик во времени.

Критериями выбора датчика давления для конкретного случая являются соответствующий диапазон измерения, требуемая точность и желаемый выходной сигнал. Однако еще одним очень важным критерием является пригодность датчика для желаемого применения. Диапазон измерения, точность и выходной сигнал являются параметрами, которые относительно легко определить. С другой стороны, для того, чтобы определить, какой тип датчика давления подходит для конкретного применения, необходимо иметь определенный опыт и тщательно рассмотреть различные аспекты, такие как его конструкция и схема построения, конструкция чувствительного элемента, структура элементной базы, топология и материалы тензосхемы и конструктивных элементов датчика.

В технологии измерения давления различают три типа давления — абсолютное давление, относительное давление и дифференциальное давление. Абсолютное давление всегда относится к абсолютному вакууму как к нулевой точке. Измерение относительного давления – это измерение перепада давления между средой и давлением окружающей среды или атмосферы.

Диапазон измерения — это диапазон давления между минимальным давлением (при котором выходной сигнал выходит на 0%) и максимальным давлением (при котором выходной сигнал выходит на 100%). Разница между минимальным и максимальным значениями называется пролетом и служит ориентиром практически для всех спецификаций точности в технике измерения давления. Как правило, диапазон измерения преобразователей давления стандартизирован в соответствии с конкретной единицей измерения давления. В дополнение к чистому диапазону сигнала необходимо также учитывать пределы избыточного давления и разрывного давления. Это важно в тех случаях, когда пики давления, даже очень короткие, могут возникать значительно выше диапазона измерения.

На практике показано, что определение требуемого класса точности или допустимой погрешности измерений манометра представляет собой большую проблему. С одной стороны, класс точности включает в себя различные аспекты или параметры неопределенности измерения, которые не имеют такого же значения в большинстве приложений. С другой стороны, часто бывает трудно определить, насколько точным должно быть измерение на стороне приложения. Более высокая точность почти всегда влечет за собой огромное влияние на стоимость продукта. Поэтому важно хорошо взвесить, что является обязательным при выборе класса точности.

Для выходного сигнала различают три основные категории: неусиленный сигнал датчика, аналоговые (стандартные) сигналы и цифровые сигналы. Выходной сигнал датчика без усиления очень редко желателен для манометров, в отличие от датчиков температуры, которые очень часто выдают сигнал резистора *PT100/PT1000* напрямую, без дополнительной электроники. Если неусиленный сигнал датчика теперь выводится, то прибор для измерения давления не является преобразователем или измерительным преобразователем в узком смысле. В этом случае ее называют измерительной ячейкой с корпусом.

Их часто также называют преобразователями. Аналоговые сигналы по-прежнему наиболее широко используются в технике измерения давления в промышленности на сегодняшний день, прежде всего токовый сигнал 4..20мА. Преимущество аналоговых сигналов по-прежнему заключается в значительно более низких затратах на преобразователи давления, а часто и на последующую электронику для оценки. Однако в последние годы стоимость цифровых передатчиков и устройств оценки значительно снизилась. Кроме того, быстро растет распространение систем сенсорных шин, таких как *IO-Link* или *CANopen*, для измерения давления. Основными преимуществами цифровых сигналов являются более высокая защита от ошибок, возможности диагностики и параметризации, а также сочетание в одном приборе нескольких измеряемых параметров, например, давления и температуры. Электронные реле давления также относятся к ДПА с цифровыми сигналами.

Изменение давления в упругом элементе приводит к деформации диафрагмы, что, в свою очередь, приводит к изменению электрического сопротивления на специально применяемых резистивных элементах. Наиболее часто используемыми сенсорными технологиями являются датчики с тонкой пленкой на стали, толстой пленкой на керамике и пьезорезистивные датчики. В датчиках с тонкой пленкой на стали резисторы напыляются на диафрагму из нержавеющей стали. Основным преимуществом этих датчиков давления является их превосходная долговременная стабильность и высокая устойчивость к скачкам давления и температурным воздействиям, а также измерение давления в больших диапазонах давления. Датчики с толстой пленкой на керамике основаны на керамическом корпусе, на который накладываются мостики сопротивления, а затем вжигаются. Керамическая мембрана считается чрезвычайно устойчивой практически ко всем агрессивным жидкостям и газам и предпочтительно используется при измерении агрессивных химических веществ. В пьезорезистивных преобразователях

давления сопротивление кремниевых полупроводниковых элементов изменяется в зависимости от давления. Эти полупроводниковые элементы изолированы от измеряемой среды масляной заливкой и тонкой разделительной диафрагмой. Благодаря высокой чувствительности и низкому гистерезису кремниевого элемента пьезорезистивные датчики особенно подходят для низких давлений и там, где требуется более высокая точность.

Порт давления соединяет манометр с технологическим процессом, в котором измеряется давление. Датчик давления внутри преобразователя должен быть плотно соединен с напорным отверстием — сварным или с эластомерными уплотнениями. На рынке представлено бесчисленное множество различных напорных соединений, геометрия и размеры которых могут сильно отличаться между собой. Помимо отраслевых предпочтений, решающим фактором при выборе соединений является, прежде всего, тип уплотнения: металлическое уплотнение или с эластомерными уплотнениями. Металлические уплотнения представляют собой либо коническую резьбу, либо уплотнительные конусы. Каждый из них механически деформируется противоположной стороной таким образом, что создается герметизирующий эффект. При высоком давлении обычно выбирают металлические уплотнительные решения.

В эластомерных уплотнениях, также известных как уплотнительные кольца или профильные уплотнения, используется цилиндрическая монтажная резьба. В канавке эластомерное уплотнение сжимается во время сборки, создавая эффект уплотнения. Эластомерный материал должен быть выбран таким образом, чтобы он был совместим с измеряемыми средами и уплотнениями во всем диапазоне температур. Большинство напорных соединений спроектированы таким образом, что датчик давления подключается к измеряемой среде с отверстием напорного канала. Однако, если необходимо измерить давление или уровень высоковязких, пастообразных или

кристаллизующихся жидкостей, используются промывочные технологические соединения.

В электрических соединениях меньше разнообразия, потому что в каждом сегменте промышленности используется только несколько типов разъемов. В целом, можно сказать, что кабельные версии непосредственно на преобразователе давления используются реже, потому что кабели более сложные, чем для версий с разъемами. Основными критериями выбора подходящего соединения являются герметичность от жидкостей и пыли, устойчивость к вибрации, а также затраты на измерительное устройство и прокладку кабелей, включая ввод в эксплуатацию. Особым требованием к преобразователям давления может быть правильное выравнивание давления внутри преобразователя и окружающей среды: на практике многие электрические соединения могут вызвать неожиданные проблемы при измерении давления.

После выбора датчика, соответствующего необходимым критериям, можно использовать его в изначально поставленных целях и процессах.

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 Материалы и принципы изготовления чувствительных элементов датчиков давления

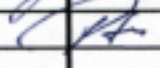
2.1 Основные конструктивно-технологические принципы изготовления чувствительных элементов

Конструктивно-технологические принципы изготовления датчиков представляют собой последовательности и закономерности обработки материалов для разработки необходимого датчика, с целью его проектирования, совершенствования и внедрения в промышленное производство.

В конструкции датчика имеется чувствительный элемент, который как может быть составной частью упругого элемента, так и являться отдельным компонентом. Например, в датчике давления упругим элементом может быть упругая мембрана, деформирующаяся под воздействием давления, а чувствительный элемент — трансдюсером, который преобразует эту деформацию в электрический сигнал. Таким образом, упругий элемент передает механическую информацию, которую чувствительный элемент, в свою очередь, преобразует в электрический сигнал, который затем может быть обработан или измерен электронными устройствами.

Одним из основных этапов разработки датчика давления является изготовление ЧЭ. Для данного этапа выработан определенный технологический маршрут изготовления, который можно поделить на следующие шаги:

- а) изготовление упругого элемента и полировка его воспринимающей поверхности (подложки);
- б) подготовка (очистка) воспринимающей поверхности ЧЭ перед нанесением тонкой изолирующей пленки;

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Материалы и принципы изготовления чувствительных элементов датчиков давления			Лит.	Лист	Листов	
Разраб.		Филатов									
Провер.		Цыпин								19	
Реценз.								гр. 20ПД1			
Н. Контр.		Рыжова		12.06.14							
Утверд.											

в) нанесение изолирующей тонкой пленки с заданными электрофизическими параметрами на воспринимающую поверхность металлического ЧЭ;

г) нанесение тонкой резистивной пленки;

д) нанесение тонкой проводящей пленки;

е) формирование топологического рисунка тензомоста на ЧЭ;

ж) термообработка сформированной схемы;

з) сборка модуля измерительного и датчика в целом, куда составными частями входят подгонка номиналов тензорезисторов, микросварка выводных проводников на контактные площадки тензосхемы и на колки промежуточной колодки, конструкционная сварка узлов будущего датчика, комплекс специальных технологических тренировок и настроечных операций.

Полный набор необходимых технологий для изготовления ЧЭ датчика насчитывает более 30 наименований. Возможный вариант структурной схемы технологического процесса формирования тонкопленочной структуры на ЧЭ датчика представлен на рисунке 2.

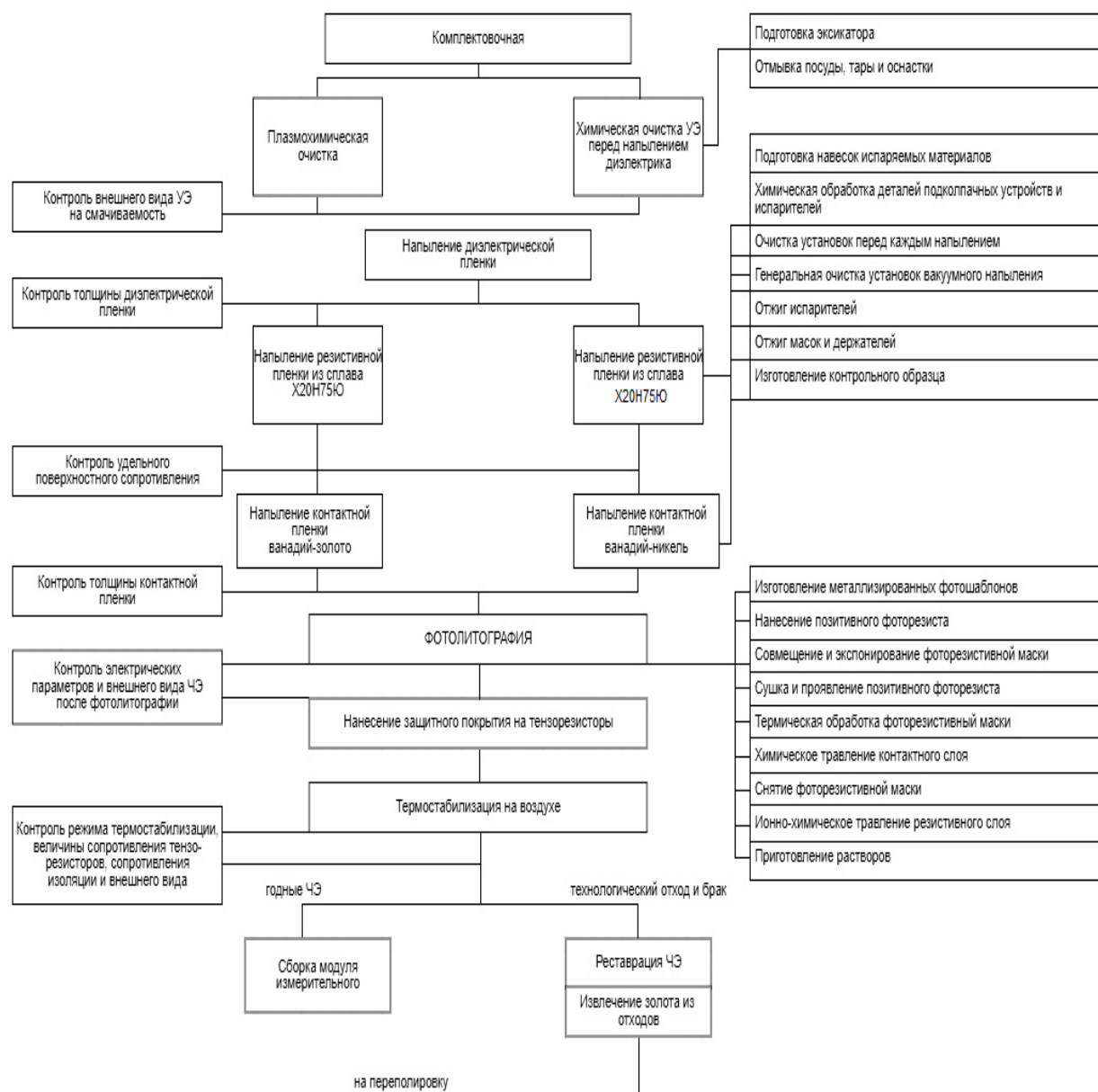


Рисунок 2 — Схема технологического процесса формирования тонкопленочной структуры на ЧЭ датчика

2.2 Выбор материалов чувствительного элемента

Выбор материалов тонкопленочной структуры производится на основании требований технического задания на датчик и их возможной реализации комплексным подбором материалов.

При выборе материала чувствительного элемента необходимо обеспечить:

- а) высокие стабильные упругие свойства во всем рабочем интервале температур;
- б) максимальную чувствительность при минимальных габаритах;
- в) линейность упругих характеристик;
- г) высокую сопротивляемость микропластических деформаций после многократных нагрузок, исключаяющие такие отрицательные явления, как гистерезис, упругие последствия ползучести, релаксация напряжений;
- д) однородность структуры материала мембраны;
- е) полируемость до шероховатости $R_{z0,05}$, в том числе с использованием электро-химико-механического метода полирования;
- ж) хорошую свариваемость со смежными деталями;
- з) коррозионную стойкость в агрессивных средах и химических реакциях.

В этом отношении наиболее приемлемыми являются нержавеющей дисперсионно-твердеющие сплавы типа 36НХТЮ, 44НХХБМЮ и элинварные сплавы типа 29Н26КХТБЮ и ВУС-22. Свойства данных и других используемых при изготовлении корпуса ЧЭ материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Свойства инварных и элинварных сплавов

Наименование сплава	Плотность, $g, \text{г/см}^3$	ТКЛР, $\times 10^6, 1/\text{град}$	Модуль упругости, $E, \text{ГПа}$	Предел упругости, $\sigma_{\text{упр}}, \text{МПа}$	ТКМУ, $\times 10^6, 1/\text{град}$
1	2	3	4	5	6
36НХТЮ	7,8	12,0-14,0	180	650-750	200-250
44НХТЮ	8,1	8,0	177-181	680-700	30
37НВКТЮ	8,0	8,3-8,6	158-160	700-750	-60...+100
70НХБМЮ	8,3	11,4-14,5	215	785-900	260
29Н26КХТБЮ	8,2	8,5	160-180	700	$\pm (10-30)$
36НКВХБТЮ (ВУС-22)	8,6	8,6-9,0	190-192	900-950	± 5

Первый слой тонкопленочной структуры — буферный подслой, материалом которого, как правило, служит хром (Cr), играющий роль демпфера между металлом УЭ и диэлектриком для снятия температурных напряжений в последнем.

Второй слой — диэлектрический, задачей которого является обеспечение электрического сопротивления между схемой тензомоста и металлом ЧЭ. В практике конструирования тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления наибольшее применение получили диэлектрические пленки монооксида кремния (SiO) и двуоксида кремния (SiO_2). Они имеют достаточно пористую структуру и их напыление происходит при низкой температуре подложки, около 280-300 градусов по Цельсию.

Третий слой — резистивный, являющийся основным рабочим слоем, из которого формируется измерительная схема и сам тензорезистор. К нему предъявляются очень жесткие требования:

- а) максимальный коэффициент тензочувствительности;
- б) высокие механические характеристики, не ниже чем у УЭ;
- в) высокое удельное сопротивление, не ниже 50 Ом/кв;
- г) высокая воспроизводимость характеристик;
- д) незначительная временная нестабильность, которая не должна превышать 0,5% за время непрерывной эксплуатации;
- е) хорошая адгезия с диэлектрическим слоем и материалом контактных групп;
- ж) низкое значение температурного коэффициента сопротивления;
- з) широкий рабочий диапазон температур;
- и) температурный коэффициент тензочувствительности должен быть близок к температурному коэффициенту модуля упругости материала УЭ и др.

Четвертый слой — контактная группа, предназначенная для подачи на измерительную цепь напряжения питания и снятия выходного сигнала. Ни один из материалов не обладает всеми необходимыми свойствами по отношению к принятым тензорезистивным сплавам, поэтому на практике делают как минимум двухслойную структуру контактных групп. В ней каждый слой решает свои более узкие задачи.

Первый слой контактной группы обеспечивает адгезию с материалом тензорезистора, минимальное контактное сопротивление, его временную стабильность и играет роль барьера для миграции последующего материала в материал тензорезистор. Если использовать сплавы с содержанием хрома, то наиболее предпочтительными материалами для данного слоя будут являться хром или ванадий.

Второй слой контактной группы должен обеспечивать максимально широкий диапазон рабочих температур, низкое удельное сопротивление контактной группы и иметь хорошую свариваемость при минимальной толщине пленки. Такими свойствами в наибольшей степени обладает золото (Au), но это резко усложняет технологический процесс изготовления датчиков и удорожает

их. Поэтому на практике для данных целей широкое применение получил никель (Ni), который удовлетворяет основным требованиям, как и золото, и уступает последнему только в температурном диапазоне.

На основе приведенной ранее информации, можно составить примерный список материалов для изготовления чувствительного элемента тензорезистивного датчика давления, их порядок и метод нанесения послойно, приведенные в таблице 3.

Таблица 3 — Материалы, используемые для изготовления чувствительного элемента тензорезистивного датчика давления

Номер слоя	Наименование слоя	Материал слоя		Метод нанесения слоя	Толщина слоя, мкм	Удельное сопротивление, Ом/кв
		Наименование, марка	ГОСТ, ТУ			
1	Диэлектрический	Хром электролитический ЭРХ-1	ТУ 14-22-50-91	Нанесение в вакууме	0,2-0,3	—
		Кремний (II) оксид (кремний монооксид) ХЧ, тип А, фракция 2	ТУ 6-09-17-225-88		2,2-2,5	
		Стекло кварцевое КУ-1	ГОСТ 15130-86		1,0-1,3	
2	Резистивный	Сплав Х20Н75Ю-ВИ	ТУ 14-222-67-76		—	70
3	Проводящий	Ванадий ВНПл-1	ТУ 48-4-373-76		—	200-250
		Золото Зл 99,99	ГОСТ 7222-75		1,4-1,7	0,025-0,1

Данные материалы будут использованы при разработке топологии чувствительного элемента датчика малых абсолютных давлений, представленной в приложении Г.

3 Модернизация чувствительного элемента датчика абсолютного давления

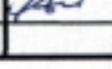
3.1 Расчет тензорезистора типа меандр

Тензорезисторы являются важнейшей составной частью чувствительного элемента датчика абсолютного давления, изменяя свое сопротивление под воздействием механического напряжения или деформации и позволяя тем самым преобразовать давление в электрический сигнал. От их значения номинального сопротивления зависит, в каком диапазоне давлений могут происходить измерения. И для того, чтобы улучшать функционал датчиков давления, в первую очередь нужно модернизировать их чувствительные элементы и тензорезисторы в частности. По этому, для разработки нового датчика с необходимыми параметрами достаточно разработать новый чувствительный элемент на базе уже готового датчика абсолютных давлений.

Для оптимизации относительного сопротивления при воздействии на упругий элемент без увеличения длины тензорезисторов чувствительного элемента можно использовать тензорезисторы формы «меандр». При конструировании резисторов сложной формы необходимо обращать внимание на правильное расположение контактов, обеспечивающее отсутствие погрешностей из-за неточности совмещения резистивного слоя и контактов. Для чувствительного элемента с четырьмя полумостами рекомендуется использовать трехполосковые тензорезисторы формы «меандр».

При разработке чувствительного элемента для соответствия необходимым параметрам в качестве тензорезистивного материала был выбран сплав Х20Н75Ю-ВИ.

Необходимо получить на тензорезисторах заданное номинальное сопротивление, равное $R = 750 \pm 50$ Ом, при поверхностном сопротивлении

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Филатов			Модернизация чувствительного элемента датчика абсолютного давления	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Цыпин					26	
Реценз.						гр. 20ПД1		
Н. Контр.		Рыжова		17.08.20				
Утверд.								

и $\rho_s = 55$ Ом/кв. Так как тензорезисторы должны быть одного размера и обеспечивать необходимое сопротивление, для минимизации их размера без больших потерь

в сопротивлении было выбрано номинальное сопротивление $R=715$ Ом.

Все расчеты сделаны в среде программирования *MathCad* приведены в приложении Б.

Расчет размеров тензорезистора начинается с вычисления коэффициента формы по формуле [1]:

$$K_{\phi} = \frac{R}{\rho_s}, \quad (1)$$

где K_{ϕ} — коэффициент формы, кв;

R – номинальное сопротивление, Ом;

ρ_s – поверхностное сопротивление, Ом/кв.

По приведенной выше формуле коэффициент формы равен:

$$K_{\phi} = \frac{R}{\rho_s} = \frac{715}{55} = 13.$$

Коэффициент формы можно приравнять к соотношению из формулы [2]:

$$K_{\phi} = \frac{l_{cp}}{b}, \quad (2)$$

где l – средняя длина, мм;

b – ширина квадрата, мм.

Допустим, $b=0,1$ мм, тогда можно определить среднюю длину меандра по формуле [3]:

$$l_{cp} = K\phi \cdot b . \quad (3)$$

Подставив значения в формулу, получаем:

$$l_{cp} = K\phi \cdot b = 13 \cdot 0.1 = 1.3 \text{ мм.}$$

Далее необходимо рассчитать шаг одного звена меандра с помощью формулы [4]:

$$t = a + b , \quad (4)$$

где t – шаг звена меандра, мм;

a – расстояние между резистивными полосками, мм.

Обычно при расчетах меандра расстояние между резистивными полосками приравнивают к ширине квадрата. Тогда, шаг одного звена меандра равен

$$t = a + b = 0.1 + 0.1 = 0.2 .$$

Далее необходимо определить оптимальное количество звеньев меандра по формуле [5]:

$$n = \sqrt{\frac{l_{cp}}{t}} . \quad (5)$$

Подставив значения в формулу выше, получаем:

$$n = \sqrt{\frac{l_{cp}}{t}} = \sqrt{\frac{1.3}{0.2}} = 2.55$$

Приравнивая значение оптимального количества звеньев меандра к ближайшему целому числу, получаем $n = 3$. По итогу данного расчета получается, что необходимо использовать трехполосковый меандр.

После определения количества звеньев, необходимо рассчитать длину меандра по формуле [6]:

$$L = n \cdot t . \quad (6)$$

Подставив значения в выражение выше, получаем:

$$L = n \cdot t = 3 \cdot 0.2 = 0.6 \text{ мм.}$$

Последним шагом рассчитываем ширину меандра по формуле [7]:

$$B = \frac{(l_{cp} - a \cdot n)}{n} . \quad (7)$$

С учетом полученных ранее значений, ширина меандра равна:

$$B = \frac{(l_{cp} - a \cdot n)}{n} = \frac{1.3 - 0.1 \cdot 3}{3} = 0.333 \text{ мм.}$$

Ширину меандра округляем до $B = 0.34$ мм.

С учетом размеров тензорезистора, рассчитанными ранее, был построен его чертеж, изображенный на рисунке 3.

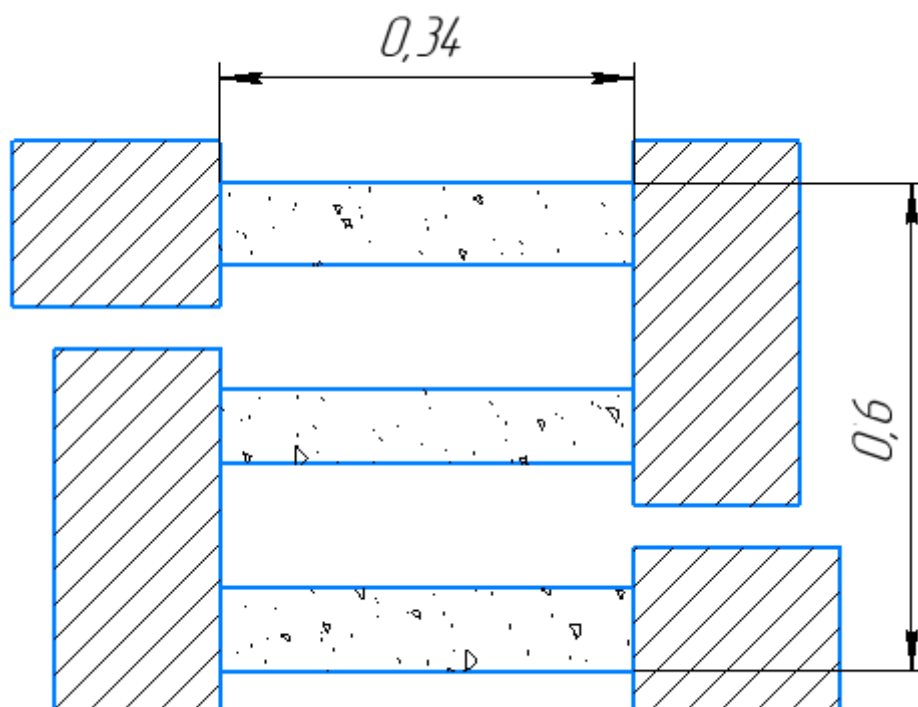


Рисунок 3 — Тензорезистор типа меандр

3.2. Разработка топологии измерительной мостовой схемы

Основным завершающим этапом проектирования чувствительного элемента является разработка его топологического чертежа и оптимизация.

Датчик малых и сверхмалых абсолютных давлений должен применяться в системах тензометрии перспективных средств выведения. Датчик имеет моноблочное конструктивное исполнение и состоит из преобразователя первичного измерительного и вторичного измерительного. Датчик должен иметь минимальные размеры и массу.

Измерение давления в диапазонах до 10 мм рт. ст. возможно только при применении двухзвенной схемы «мембрана-балка». В соответствии с ней, давление действует на мембрану, которая преобразует его в перемещение балочного упругого элемента. Перемещение преобразуется балкой в деформацию, деформация же преобразуется тензорезистором в относительное изменение сопротивления.

В качестве воспринимающей мембраны применена круглая гофрированная мембрана. Выбор данной мембраны обоснован тем, что технология ее изготовления хорошо отработана и многолетняя эксплуатация данной мембраны в составе датчиков абсолютного давления показал ее хорошие метрологические характеристики.

К выбору конструкции балочного упругого элемента предъявляются повышенные требования, так как он в основном определяет метрологические характеристики датчика. Учитывая необходимость измерения сверхмалых абсолютных давлений, балочный упругий элемент должен обладать повышенной чувствительностью и воспроизводимостью.

Ширина рабочей части упругого элемента сделана переменной для увеличения чувствительности. Толщина рабочей части балки зависит от диапазона измерений.

Данная мостовая измерительная схема состоит из четырех полумостов, каждый из которых состоит из двух тензорезисторов. Тензорезисторы R1, R3, R5, R7 расположены в зоне сжатия, R2, R4, R6, R8 – в зоне растяжения. Тензорезисторы выполнены в виде трехполосковых меандров, что позволяет обеспечить необходимое значение их номинального сопротивления, равное $R = 750 \pm 50 \text{ Ом}$.

В качестве материалов диэлектрического слоя для соответствия необходимым параметрам и условиям были выбраны хром электрический, монооксид кремния и кварцевое стекло. Для проводящего слоя ванадий и золотая проволока.

Для производства чувствительного элемента была составлена маршрутная карта, представленная в приложении В. В маршрутной карте указаны операции по изготовлению детали в необходимой последовательности, применяемые для этого оборудование и специальная технологическая оснастка.

Топология чувствительного элемента и его резистивного и проводящего слоев разработана в соответствии с приведенными ранее данными и изображена в приложении Г.

4 Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории

4.1 Расчет освещённости лаборатории по проектированию датчиков абсолютного давления

Лаборатория, в которой проводилось проектирование датчика абсолютного давления, имеет размеры: $a = 8$ м; $b = 8$ м; $H = 4$ м. Высота рабочих столов, находящихся в лаборатории и применяемых работниками при проектировании $h_{рс} = 0,8$ м. Необходимо рассчитать равномерное освещение на уровне рабочей плоскости при использовании встраиваемых светильников типа ЛВО-4х18-CSVT.

Нормы освещенности в зданиях управления конструкторских и проектных организаций, научно-исследовательских учреждений указаны в СНиП П-4-79. По данным нормам было определено, что норма освещенности в лаборатории $E = 300$ лк и коэффициент запаса $K_z = 1,5$.

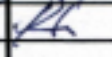
Так как светильники встраиваемые, принимаем, что $h_{св} = 0$ м. В соответствии с этим, высота подвеса светильника $h = 0$ м.

Характеристики светильника ЛВО-4х18-CSVT указаны в таблице 4.

Таблица 4 — Характеристики светильника типа ЛВО-4х18-CSVT

Число ламп, шт x мощность ламп, Вт	Длина x ширина, мм	Вид установки	Условия эксплуатации
4 x 18	595 x 595	Встраиваемый	Для нормальных условий среды

Расстояние между соседними рядами светильников равно $L = 4$ м.

					ПГУ 2. 11.03.04. 015 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Фисатов			Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Цыпин					33	
Реценз.						гр. 20ПД1		
Н. Контр.		Рыжова		17.06.14				
Утверд.								

Количество рядов светильников находится по формуле [8]:

$$np = \frac{b}{L}. \quad (8)$$

Следовательно, количество рядов светильников равно:

$$np = \frac{b}{L} = \frac{8}{4} = 2.$$

Индекс помещения I рассчитывается по формуле [9]:

$$I = \frac{a \cdot b}{H \cdot (a + b)}. \quad (9)$$

Следовательно, индекс помещения равен:

$$I = \frac{a \cdot b}{H \cdot (a + b)} = \frac{8 \cdot 8}{4 \cdot (8 + 8)} = 1.$$

По рисунку 4 можно определить коэффициент использования светового потока для светильников типа ЛВО-4х18-CSVT.

Индекс поме- щения i	Коэффициент использования η , %		
0,5	28 26 25 22 19	28 26 19 17 14	28 27 21 18 16
0,6	32 32 32 26 23	31 29 23 20 18	33 32 25 22 20
0,7	36 34 33 30 26	36 34 28 24 22	38 36 30 26 24
0,8	39 36 36 32 29	39 37 30 26 24	42 39 33 29 28
0,9	42 39 38 35 31	43 40 34 29 27	46 42 37 32 31
1,0	44 41 40 37 33	46 42 36 32 30	49 45 40 35 34
1,1	46 42 42 39 35	48 44 38 34 31	52 48 42 38 36
1,25	48 44 43 41 37	51 47 41 36 34	55 50 45 40 39
1,5	51 47 46 44 40	55 50 45 40 37	60 54 49 45 44
1,75	54 49 48 46 42	58 53 48 42 40	63 57 52 48 47
2,0	55 50 49 47 44	60 55 49 44 41	65 59 55 51 49
2,5	58 53 52 50 46	65 58 52 48 45	70 63 59 55 54
3,0	60 54 53 51 48	67 60 54 50 46	73 65 61 58 56
4,0	62 56 54 53 50	70 62 57 53 49	77 68 64 61 59

Рисунок 4 — Коэффициент использования светового потока

Следовательно из данных производителя, коэффициент использования светового потока η равен 0,53.

Световой поток от светильников одного ряда Φ_p находится по формуле [10]:

$$\Phi_p = \frac{E \cdot K_z \cdot a \cdot b}{n_p \cdot \eta}.$$

Следовательно, световой поток от светильников одного ряда равен:

$$\Phi_p = \frac{E \cdot K_z \cdot a \cdot b}{n_p \cdot \eta} = 2.717 \times 10^4.$$

Так как в светильнике типа ЛВО-4х18-CSVT применяются лампы мощностью 6 Вт, можно выбрать лампы типа ЛЛ 18Вт L18W/765 со световым потоком $\Phi_{\text{л}} = 1050$ лм.

Исходя из того, что в светильнике используются 4 люминесцентные лампы, в ряду необходимо установить

$$n_{л} = \frac{\Phi_p}{4 \cdot \Phi_{л}} = \frac{2.717 \cdot 10^4}{4 \cdot 1050} = 6.469 \approx 7 \text{ светильников.}$$

При использовании ламп данного типа длина одного ряда светильников $L_{р1} = L_{св} \cdot n_{л} = 0,595 \cdot 7 = 4,165 \text{ м.}$

При использовании данных ламп светильники заполняют ряд почти без разрывов.

Расчетная освещенность E_p и относительная погрешность расчета $\delta_{отн}$ определяются по формулам [11] и [12] соответственно:

$$E_p = \frac{E \cdot \Phi_{л} \cdot n_{л} \cdot 2}{\Phi_p}; \quad (11)$$

$$\delta = \frac{E_p - E}{E} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Следовательно данным формулам, расчетная освещенность и относительная погрешность равны:

$$E_p = \frac{E \cdot \Phi_{л} \cdot n_{л} \cdot 2}{\Phi_p} = \frac{300 \cdot 1050 \cdot 7 \cdot 2}{2.717 \cdot 10^4} = 162.311 \text{ лм;}$$

$$\delta = \frac{E_p - E}{E} \cdot 100\% = \frac{162.311 - 300}{300} \cdot 100\% = -0.459\%.$$

Расчет окончен, так как отклонение расчетной освещенности от нормируемой не превышает допустимые пределы от +20% до -10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был проведен анализ современной датчиковой аппаратуры, а также датчиков давления и их чувствительных элементов в частности. Были рассмотрены общие сведения об их принципе работы, области применения, параметрах, требованиях к ним, методах их разработки и используемых при изготовлении материалов.

Рассмотрена классификация датчиков по типу контролируемого параметра, а также отдельная классификация для датчиков давления.

Приведены конкретные материалы, используемые при нанесении определенных слоев чувствительных элементов на современных отечественных производствах.

Анализ данных результатов помог подробнее разобраться в целях применения датчиков давления, их принципе работы и в их изготовлении. Более подробно были рассмотрены чувствительные элементы, являющиеся одной из важнейших составных частей датчиков давления.

Была разработана топология чувствительного элемента для изготовления датчика малых абсолютных давлений с четырьмя полумостами на основе трехполосковых тензорезисторах формы «меандр».

Реализация результатов исследовательских работ позволят создать датчик малых абсолютных давлений с металлопленочным чувствительным элементом тензорезистивного типа с улучшенными функциональными возможностями.

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Микротехнологии в космосе. 2010. Труды VIII научно-технической конференции "Микротехнологии в космосе" [Текст] / Под ред. Ю.М. Урличина, А.А. Романова - М.: Радиотехника, 2011. - 208 с.: ил.
2. Теория, расчет и основы проектирования датчиков механических величин: Учебное пособие. [Текст] / Тихоненков В.А., Тихонов А.И. - Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 452 с.
3. Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы - 2012) [Текст] / Под ред. А.Г. Дмитриенко, Е.А. Ломтева - Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. - 330 с.
4. Проектирование датчиков для измерения механических величин [Текст] / Под ред. Е.П. Осадчего - М.: Машиностроение, 1979. - 480 с., ил.
5. Интегральные тензопреобразователи [Текст] / Ваганов В.И. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 136 с., ил.
6. Электрические измерения неэлектрических величин [Текст] / Под ред. П.В. Новицкого - Ленинград: Издательство "Энергия", 1975. - 576 с., ил.
7. Проектирование датчиков на основе тонкопленочных технологий: Учебное пособие. [Текст] / Е.А. Мокров, И.В. Волохов, О.Н. Герасимов, Ю.М. Крысин — Пенза.: Изд-во ПГУ, 2007. - 79 с.
8. *Pressure Sensors: Types, Use Cases, and Definition* [Электронный ресурс] / *UpKeep Technologies, Inc.*, 2024:[сайт].
URL: <https://upkeep.com/learning/pressure-sensor/>
9. *The way to the ideal pressure transmitter: Making the right decision thanks to sound know-how* [Электронный ресурс] / *Trafag AG*, 2024:[сайт].
URL: https://media.trafag.com/literature/tech-info/H70363_EN_The_way_to_the_ideal_pressure_transmitter.pdf
10. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок [Текст] / Коледов Л. А. - М.: Радио и связь, 1989. - 400 с.: ил.

11. *The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor* [Текст] / Meng X., Zhao Y. - MDPI «Sensors», 2016. - 348 с.
12. Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилируемых кремниевых мембран [Текст] / Землянников Н.С., Данилова Н.Л., Панков В.В., Суханов В.С., Михайлов Ю.А.
13. Тензорезистивный интегральный МЭМС-преобразователь давления мембранного типа [Текст] / Суханов В.С., Панков В.В., Годовицын И.В., Михайлов Ю.А., Данилова Н.Л., Землянников Н.С.
14. Повышение точности пьезорезистивных датчиков давления [Текст] / Львов А. А., Коновалов Р. С., Львов П. А. - ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ, 2015.
15. Датчики давления в России и за рубежом [Текст] / Белозубов Е. М. - Метрология, 2010. - 20 с.
16. Разработка и изготовление микрoeлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации [Текст] / Баринов, И. Н., Волков, В. С., Цыпин, Б. В., & Евдокимов, С. П. - Датчики и системы, 2014. - 63 с.
17. *Handbook of Modern Sensors* [Текст] / Джейкоб Фрайден - Springer-Verlag New York, Inc., 2010. - 681 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Обязательное)

Задание на выпускную квалификационную работу

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

«Утверждаю»
Зав. кафедрой НиМЭ
Пронин И.А.
(фамилия, инициалы)
«05» июня 2024 г.

З А Д А Н И Е
на бакалаврскую работу

1. Студент(ка) гр. 20ПД1 факультета информационных технологий и электроники

Направление подготовки 11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника»

Профиль Микроэлектроника и твердотельная электроника

Филатов Егор Сергеевич

(фамилия, имя, отчество)

2. Руководитель Цыпин Борис Вульфoвич

(фамилия, имя, отчество)

3. Тема бакалаврской работы Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений

Тема утверждена приказом ПГУ № 369а/о от «17» апреля 2024 г.

4. Техническое задание на бакалаврскую работу (вид работы: разработка, проектирование, исследование, и т.д.; назначение; основные параметры; условия функционирования и т.д.)

1. Провести исследование тонкопленочных датчиков абсолютного давления. Назначение — измерение абсолютного давления жидких и газообразных агрессивных и неагрессивных сред и преобразование его в электрический сигнал

2. Разработать датчик малых абсолютных давлений на основе модернизации чувствительного элемента

Параметры разработки:

— Проектирование тензорезистора формы меандр с заданным номинальным сопротивлением $R=750\pm 50$ Ом;

— Расчет топологии чувствительного элемента с применением спроектированных ранее тензорезисторов.

5. Объем и содержание основной части бакалаврской работы

5.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, обоснований, описаний, расчетов и т.д.)

1 Общие сведения о датчиках давления и датчиков-преобразующей аппаратуре

1.1 Принцип работы и область применения датчиков давления

1.2 Классификация датчиков и датчиков-преобразующей аппаратуры

1.3 Требования к датчикам давления и критерии их выбора

2 Материалы и принципы изготовления чувствительных элементов датчиков давления

2.1 Основные конструктивно-технологические принципы изготовления чувствительных элементов

2.2 Выбор материалов чувствительного элемента

3 Модернизация чувствительного элемента датчика абсолютного давления

3.1 Расчет тензорезистора типа меандров

3.2 Разработка топологии измерительной мостовой схемы

4 Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории

4.1 Расчет освещённости лаборатории по проектированию датчиков давления

5.2. Иллюстративная часть (перечень и содержание чертежей и слайдов презентации)

1 Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений

2 Постановка цели и задач исследования

3 Актуальность работы

4 Классификация ДПА по типу контролируемого параметра

5 Тензорезистивный датчик

6 Требования к датчикам абсолютных давлений

7 Технологический маршрут изготовления чувствительного элемента

8 Схема технологического процесса формирования тонкопленочной структуры на ЧЭ датчика

9 Критерии выбора материала ЧЭ

10 Свойства инварных и элинварных сплавов, используемых в качестве материала ЧЭ

11 Слои тонкопленочной структуры на ЧЭ

12 Расчет тензорезистора

13 Разработка топологии ЧЭ

14 Расчет освещенности лаборатории

15 Заключение и вывод исследования

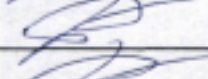
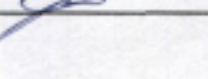
16 Спасибо за внимание

6. Консультанты и содержание дополнительных разделов

6.1.

Консультант

7. Календарный график по выполнению бакалаврской работы

Наименование этапов работы	Объем работы	Срок выполнения	Подпись руководителя, консультанта
Общие сведения о датчиках давления и датчико-преобразующей аппаратуре	30%	05.06.2024	
Материалы и принципы изготовления чувствительных элементов датчиков давления	25%	06.06.2024	
Модернизация чувствительного элемента датчика абсолютного давления	20%	07.06.2024	
Техника безопасности и охрана труда работника лаборатории	5%	08.06.2024	
Иллюстративная часть	12%	08.06.2024	
Оформление пояснительной записки	8%	08.06.2024	

Руководитель бакалаврской работы


подпись

Цыпин Б.В.

фамилия, инициалы

Дата выдачи задания

«05» июня 2024 г.

Задание к исполнению принял


подпись

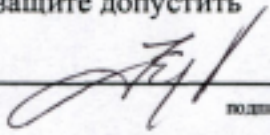
Филатов Е.С.

фамилия, инициалы

«05» июня 2024 г.

Бакалаврскую работу к защите допустить

Декан факультета


подпись

Кревчик В.Д.

фамилия, инициалы

«17» июля 2024 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(Обязательное)

Расчет размеров тензорезистора типа меандр в среде программирования

MathCad

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

$$\underline{R} := 715 \quad \rho s := 55$$

$$b := 0.1$$

$$a := b$$

$$K\phi := \frac{R}{\rho s} = 13$$

$$lcp := K\phi \cdot b$$

$$\underline{K\phi} := \frac{lcp}{b}$$

$$lcp = 1.3$$

$$t := a + b = 0.2$$

$$nomr := \sqrt{\frac{lcp}{t}} = 2.55$$

$$\underline{nomr} := 3$$

$$\underline{L} := nomr \cdot t = 0.6$$

$$B := \frac{(lcp - a \cdot nomr)}{nomr} = 0.333$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(Обязательное)

Маршрутная карта на разработку чувствительного элемента датчика
абсолютного давления

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

МАРШРУТНАЯ КАРТА ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ

Элемент чувствительный
наименование детали

ПГУ 11.03.04.015
номер детали

Датчик давления
индекс изделия

Цех изгото- витель	Номер операции	Наименование операции	Шифр и наименова- ние специальной тех- нологической оснастки	Применяемое оборудова- ние
54	005	Комплектование		
54	010	Контроль внешнего вида		Микроскоп МБС-9
54	015	Контроль комплектации		Микроскоп МБС-9
54	020	Химическая обработка в изопро- пиловом спирте		Шкаф вытяжной 2Ш-НЖ
54	025	Плазмохимическая обработка		Установка плазмохимиче- ской обработки «Рисо»
54	030	Напыление диэлектрической пленки SiO с подслоем Cr	Держатель МКНИ.443223.282	Установка напыления УВН-71ПЗ
54	035	Напыление диэлектрической пленки SiO ₂	Держатель МКНИ.443223.284; МКНИ.443223.282	Установка напыления УРМ 3.279.014
54	040	Напыление резистивного спла- ва X20H75Ю-ВИ	Держатель МКНИ.443223.282	Установка напыления УВН-71ПЗ
54	045	Напыление структуры вана- дий-золото (V-Au)	Держатель МКНИ.443223.282	Установка напыления УВН-71ПЗ
54	050	Контроль исполнителем		Стол монтажный СМ-5
54/19	055	Технический контроль		Стол монтажный СМ-5
54	060	Нанесение позитивного фото- резиста	Приспособление МКНИ.443254.118	Установка нанесения фоторезиста ПНФ-6Ц
54	065	Совмещение и экспонирование первого слоя	Столик к установке СТ-301 МКНИ.443254.107	Установка СТ-301
54	070	Проявление позитивного фоторезиста	Ванночка для прояв- ления ВТ П137-75	Шкаф вытяжной 2Ш-НЖ
54	075	Термическая обработка фоторезиста		Шкаф сушильный СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И2М
54	080	Травление золота	Вставка в чашку ЧБН-1-100	Шкаф вытяжной 2Ш-НЖ
54	085	Травление ванадия		Шкаф вытяжной 2Ш-НЖ
54	090	Снятие позитивного фоторезиста с первого слоя	Кассета для травления МКНИ.443219.008	
54	095	Нанесение позитивного фото- резиста	Приспособление МКНИ.443254.118	Установка нанесения фоторезиста ПНФ-6Ц
54	100	Совмещение и экспонирование второго слоя	Столик к установке СТ-301 МКНИ.443254.107	Установка СТ-301

54	105	Проявление позитивного фоторезиста	Ванночка для проявления ВТ П137-75	Шкаф вытяжной 2Ш-НЖ
54	110	Термическая обработка фоторезиста		Шкаф сушильный СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И2М
54	115	Ионно-химическое травление резистивных и диэлектрических пленок	Держатель МКНИ.443223.283	Установка УРМ 3.279.029
54	120	Снятие позитивного фоторезиста со второго слоя		Ионный источник ИИ-4-0-15
54	125	Контроль исполнителем		
54	130	Термообработка в вакууме		Установка УВН 2М-1 Выдержка при температуре 250 °С 30 минут. Остывание до (40±10) °С
54	135	Термообработка на воздухе		Шкаф сушильный вакуумный ШСФ-65/50 Выдержка при температуре 100 °С 40 минут. Остывание до (40±10) °С
54	140	Контроль исполнителем		Стол мотажный СМП-1, микроскоп МБС-9
54/19	145	Технический контроль ЭЧ		Проверка элемента чувствительного на соответствие требованиям конструкторской документации

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(Обязательное)

Топология чувствительного элемента датчика давления

Рисунок 1 (10:1)
Вид на слой № 2 (резисторы)

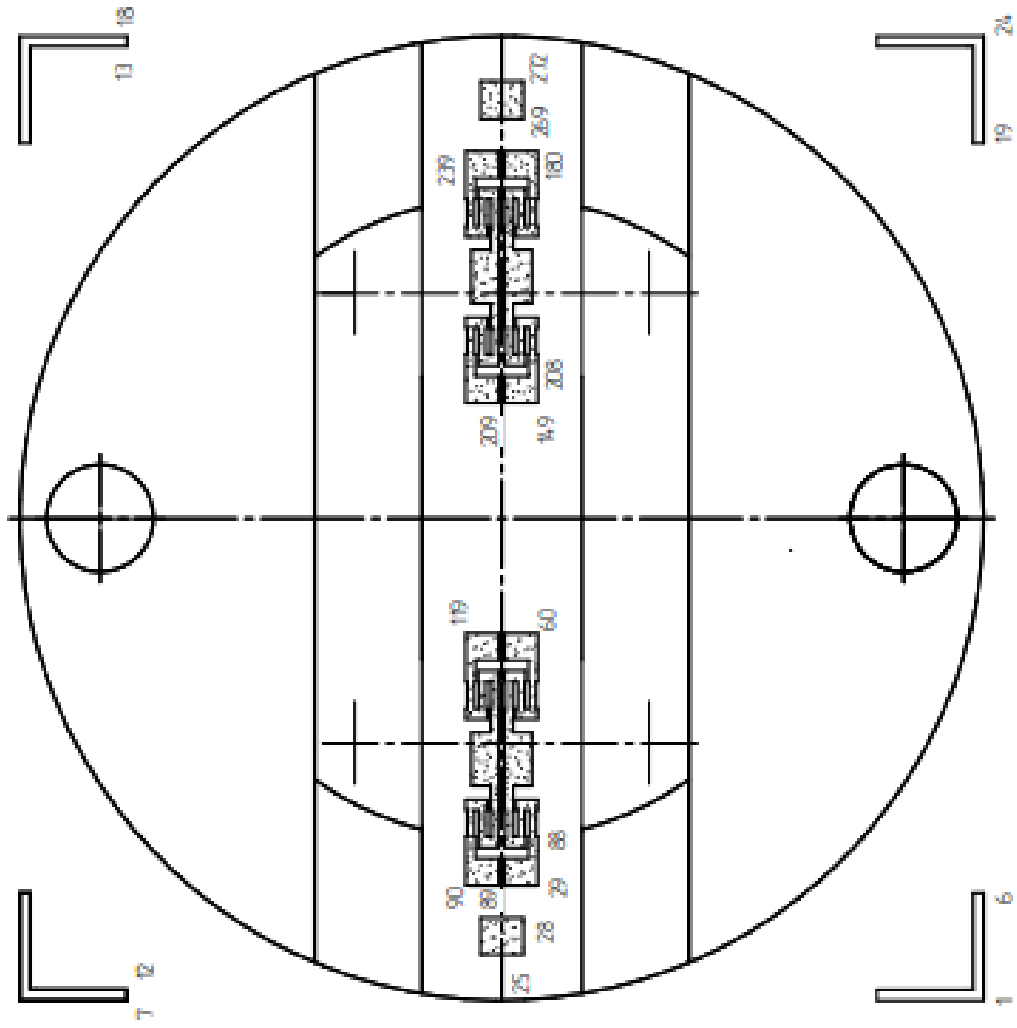


Таблица 2

№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		Контакты	
	Х	У		Х	У		Х	У		Х	У	Х	У
1	0,0000	00,000	26	0,8500	9,4000	51	5,9500	8,5600	76	4,0000	8,7850	4,0000	8,7850
2	0,0000	20,000	27	1,9500	9,4000	52	5,9500	8,5800	77	3,5900	8,7850	3,5900	8,7850
3	0,2000	20,000	28	1,9500	8,6000	53	5,4500	8,5800	78	3,5900	8,8050	3,5900	8,8050
4	0,2000	02,000	29	2,1500	8,3350	54	5,4500	8,4800	79	3,0500	8,8050	3,0500	8,8050
5	2,0000	02,000	30	2,1500	8,9900	55	5,9500	8,4800	80	3,0500	8,7050	3,0500	8,7050
6	2,0000	00,000	31	2,6500	8,9900	56	5,9500	8,5000	81	3,5900	8,7050	3,5900	8,7050
7	0,0000	16,0000	32	2,6500	8,5000	57	6,3500	8,5000	82	3,5900	8,7250	3,5900	8,7250
8	0,0000	18,0000	33	3,0500	8,5000	58	6,3500	8,9500	83	3,7500	8,7250	3,7500	8,7250
9	2,0000	18,0000	34	3,0500	8,4800	59	6,8800	8,9500	84	3,7500	8,3350	3,7500	8,3350
10	2,0000	17,8000	35	3,9900	8,4800	60	6,8800	8,3390	85	3,5900	8,3350	3,5900	8,3350
11	0,2000	17,8000	36	3,9900	8,5800	61	5,9500	8,3390	86	3,5900	8,3950	3,5900	8,3950
12	0,2000	16,0000	37	3,0500	8,5800	62	5,9500	8,3950	87	3,0500	8,3950	3,0500	8,3950
13	17,8000	16,0000	38	3,0500	8,5600	63	5,4500	8,3950	88	3,0500	8,3350	3,0500	8,3350
14	17,8000	17,8000	39	2,8500	8,5600	64	5,4500	8,3390	89	2,1900	9,0900	2,1900	9,0900
15	16,0000	17,8000	40	2,8500	8,9900	65	5,2500	8,3390	90	2,1900	9,6650	2,1900	9,6650
16	16,0000	18,0000	41	3,0500	8,9900	66	5,2500	8,7250	91	3,0500	9,6650	3,0500	9,6650
17	18,0000	18,0000	42	3,0500	8,9300	67	5,4500	8,7250	92	3,0500	9,6450	3,0500	9,6450
18	18,0000	16,0000	43	3,9900	8,9300	68	5,4500	8,7050	93	3,5900	9,6450	3,5900	9,6450
19	16,0000	00,000	44	3,9900	8,9900	69	5,9500	8,7050	94	3,5900	9,6650	3,5900	9,6650
20	16,0000	02,000	45	5,4500	8,9900	70	5,9500	8,8050	95	3,7500	9,6650	3,7500	9,6650
21	17,8000	02,000	46	5,4500	8,9300	71	5,4500	8,8050	96	3,7500	9,2750	3,7500	9,2750
22	17,8000	20,000	47	5,9500	8,9300	72	5,4500	8,7850	97	3,5900	9,2750	3,5900	9,2750
23	18,0000	20,000	48	5,9500	8,9900	73	5,0000	8,7850	98	3,5900	9,2950	3,5900	9,2950
24	18,0000	00,000	49	6,1500	8,9900	74	5,0000	8,4350	99	3,0500	9,2950	3,0500	9,2950
25	08,900	86,000	50	6,1500	8,5600	75	4,0000	8,4350	100	3,0500	9,1950	3,0500	9,1950

Продолжение таблицы 2

№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты	
	Х	У		Х	У		Х	У		Х	У
101	3,5500	9,1950	126	5,4500	9,4200	151	11,6500	8,9500	176	14,9500	8,5000
102	3,5500	9,2150	127	5,9500	9,4200	152	11,6500	8,5000	177	15,3500	8,5000
103	4,0000	9,2150	128	5,9500	9,4400	153	12,0500	8,5000	178	15,3500	8,9500
104	4,0000	9,5650	129	6,1500	9,4400	154	12,0500	8,4800	179	15,8500	8,9500
105	5,0000	9,5650	130	6,1500	9,0500	155	12,5500	8,4800	180	15,8500	8,3350
106	5,0000	9,2150	131	5,9500	9,0500	156	12,5500	8,5800	181	14,9500	8,3350
107	5,4500	9,2150	132	5,9500	9,0700	157	12,0500	8,5800	182	14,9500	8,3550
108	5,4500	9,1950	133	5,4500	9,0700	158	12,0500	8,5600	183	14,4500	8,3550
109	5,9500	9,1950	134	5,4500	9,0500	159	11,8500	8,5600	184	14,4500	8,3350
110	5,9500	9,2950	135	3,5500	9,0500	160	11,8500	8,9500	185	14,2500	8,3350
111	5,4500	9,2950	136	3,5500	9,0700	161	12,0500	8,9500	186	14,2500	8,7250
112	5,4500	9,2750	137	3,0500	9,0700	162	12,0500	8,9300	187	14,4500	8,7250
113	5,2500	9,2750	138	3,0500	9,0500	163	12,5500	8,9300	188	14,4500	8,7050
114	5,2500	9,6650	139	2,8500	9,0500	164	12,5500	8,9500	189	14,9500	8,7050
115	5,4500	9,6650	140	2,8500	9,4400	165	14,4500	8,9500	190	14,9500	8,8050
116	5,4500	9,6450	141	3,0500	9,4400	166	14,4500	8,9300	191	14,4500	8,8050
117	5,9500	9,6450	142	3,0500	9,4200	167	14,9500	8,9300	192	14,4500	8,7850
118	5,9500	9,6650	143	3,5500	9,4200	168	14,9500	8,9500	193	14,0000	8,7850
119	6,8500	9,6650	144	3,5500	9,5200	169	15,1500	8,9500	194	14,0000	8,4350
120	6,8500	9,0500	145	3,0500	9,5200	170	15,1500	8,5600	195	13,0000	8,4360
121	6,3500	9,0500	146	3,0500	9,5000	171	14,9500	8,5600	196	13,0000	8,7850
122	6,3500	9,5000	147	2,6500	9,5000	172	14,9500	8,5800	197	12,5500	8,7850
123	5,9500	9,5000	148	2,6500	9,0500	173	14,4500	8,5800	198	12,5500	8,8050
124	5,9500	9,5200	149	11,1500	8,3350	174	14,4500	8,4800	199	12,0500	8,8050
125	5,4500	9,5200	150	11,1500	8,9500	175	14,9500	8,4800	200	12,0500	8,7050

Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инд. №	Инд. № подл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ПУ 2 11.03.04. 015 МП

Лист

3

Корректировка

Формат А4

Рисунок 2 (10:1)
Вид на слой № 3 (проводники)

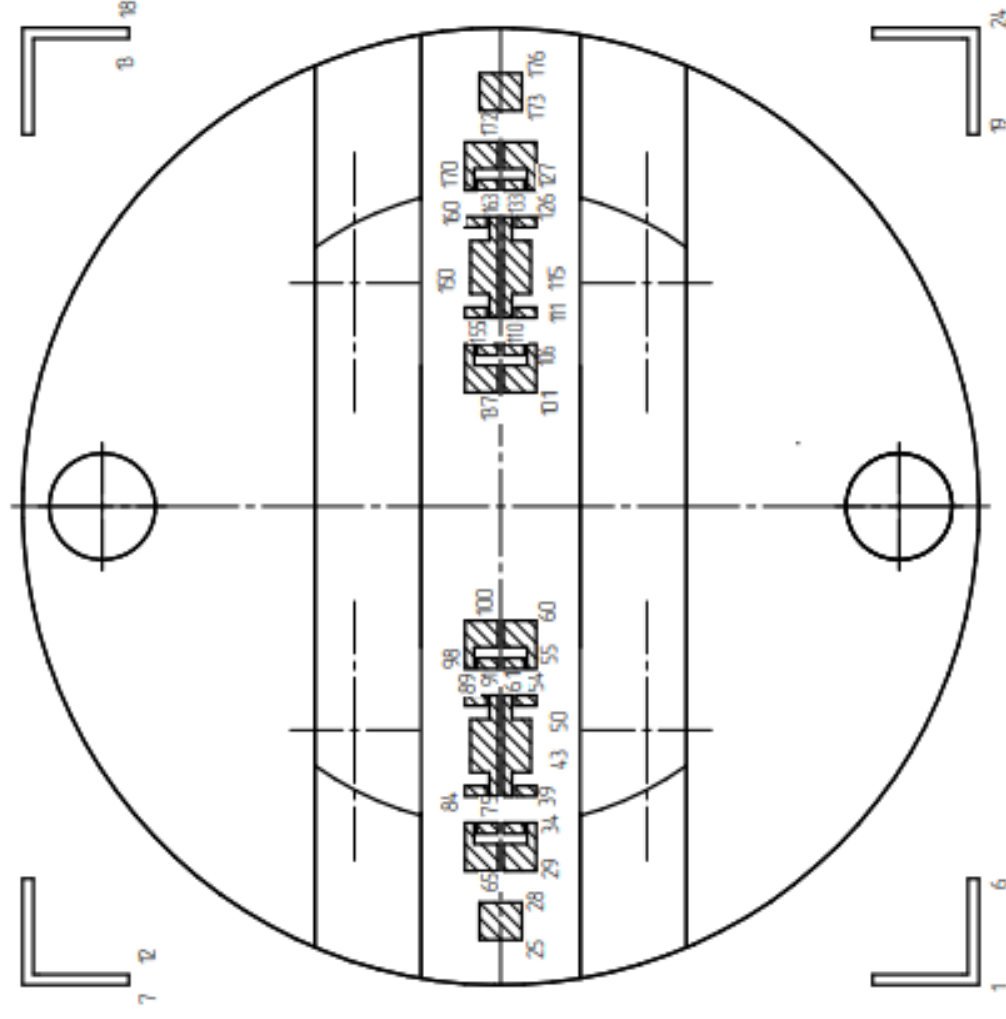


Таблица 3

№ n/n	Координаты		№ n/n	Координаты		№ n/n	Координаты		№ n/n	Контакты	
	X	Y		X	Y		X	Y		X	Y
1	0,0000	0,0000	26	0,8500	9,4000	51	5,2500	8,3350	76	3,5500	9,2150
2	0,0000	2,0000	27	15500	9,4000	52	5,2500	8,7250	77	4,0000	9,2150
3	0,2000	2,0000	28	15500	8,6000	53	5,4500	8,7250	78	4,0000	9,5650
4	0,2000	0,2000	29	2,1500	8,3350	54	5,4500	8,3350	79	5,0000	9,5650
5	2,0000	0,2000	30	2,1500	8,9500	55	5,9500	8,3350	80	5,0000	9,2150
6	2,0000	0,0000	31	2,6500	8,9500	56	5,9500	8,5000	81	5,4500	9,2150
7	0,0000	16,0000	32	2,6500	8,5000	57	6,3500	8,5000	82	5,4500	9,0500
8	0,0000	18,0000	33	3,0500	8,5000	58	6,3500	8,9500	83	3,5500	9,2750
9	2,0000	18,0000	34	3,0500	8,3350	59	6,8500	8,9500	84	3,5500	9,6650
10	2,0000	17,8000	35	2,8500	8,5600	60	6,8500	8,3350	85	3,7500	9,6650
11	0,2000	17,8000	36	2,8500	8,9500	61	5,9500	8,5600	86	3,7500	9,2750
12	0,2000	16,0000	37	3,0500	8,9500	62	5,9500	8,9500	87	5,2500	9,2750
13	17,8000	16,0000	38	3,0500	8,5600	63	6,1500	8,9500	88	5,2500	9,6650
14	17,8000	17,8000	39	3,5500	8,3350	64	6,1500	8,5600	89	5,4500	9,6650
15	16,0000	17,8000	40	3,5500	8,7250	65	2,1500	9,0500	90	5,4500	9,2750
16	16,0000	18,0000	41	3,7500	8,7250	66	2,1500	9,6650	91	5,9500	9,0500
17	18,0000	18,0000	42	3,7500	8,3350	67	3,0500	9,6650	92	5,9500	9,4400
18	18,0000	16,0000	43	4,0000	8,4350	68	3,0500	9,5000	93	6,1500	9,4400
19	16,0000	0,0000	44	4,0000	8,7850	69	2,6500	9,5000	94	6,1500	9,0500
20	16,0000	0,2000	45	3,5500	8,7850	70	2,6500	9,0500	95	6,3500	9,0500
21	17,8000	0,2000	46	3,5500	8,9500	71	2,8500	9,0500	96	6,3500	9,5000
22	17,8000	2,0000	47	5,4500	8,9500	72	2,8500	9,4400	97	5,9500	9,5000
23	18,0000	2,0000	48	5,4500	8,7850	73	3,0500	9,4400	98	5,9500	9,6650
24	18,0000	0,0000	49	5,0000	8,7850	74	3,0500	9,0500	99	6,8500	9,6650
25	0,8500	8,6000	50	5,0000	8,4350	75	3,5500	9,0500	100	6,8500	9,0500

Продолжение таблицы 3

№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты		№ п/п	Координаты	
	Х	У		Х	У		Х	У		Х	У
101	11,1500	8,3350	120	14,4500	8,7850	139	12,0500	9,6650	158	12,7500	9,2750
102	11,1500	8,9500	121	14,0000	8,7850	140	12,0500	9,5000	159	14,2500	9,2750
103	11,6500	8,9500	122	14,0000	8,4350	141	11,6500	9,5000	160	14,2500	9,6650
104	11,6500	8,5000	123	14,2500	8,3350	142	11,6500	9,0500	161	14,4500	9,6650
105	12,0500	8,5000	124	14,2500	8,7250	143	11,8500	9,0500	162	14,4500	9,2750
106	12,0500	8,3350	125	14,4500	8,7250	144	11,8500	9,4400	163	14,9500	9,0500
107	11,8500	8,5600	126	14,4500	8,3350	145	12,0500	9,4400	164	14,9500	9,4400
108	11,8500	8,9500	127	14,9500	8,3350	146	12,0500	9,0500	165	15,1500	9,4400
109	12,0500	8,9500	128	14,9500	8,5000	147	12,5500	9,0500	166	15,1500	9,0500
110	12,0500	8,5600	129	15,3500	8,5000	148	12,5500	9,2150	167	15,3500	9,0500
111	12,5500	8,3350	130	15,3500	8,9500	149	13,0000	9,2150	168	15,3500	9,5000
112	12,5500	8,7250	131	15,8500	8,9500	150	13,0000	9,5650	169	14,9500	9,5000
113	12,7500	8,7250	132	15,8500	8,3350	151	14,0000	9,5650	170	14,9500	9,6650
114	12,7500	8,3350	133	14,9500	8,5600	152	14,0000	9,2150	171	15,8500	9,6650
115	13,0000	8,4350	134	14,9500	8,9500	153	14,4500	9,2150	172	15,8500	9,0500
116	13,0000	8,7850	135	15,1500	8,9500	154	14,4500	9,0500	173	16,450	8,6000
117	12,5500	8,7850	136	15,1500	8,5600	155	12,5500	9,2750	174	16,4500	9,4000
118	12,5500	8,9500	137	11,1500	9,0500	156	12,5500	9,6650	175	17,1500	9,4000
119	14,4500	8,9500	138	11,1500	9,6650	157	12,7500	9,6650	176	17,1500	8,6000

Инд. № подл.	Подп. и дата
Взам. инд. №	Инд. № докл.
Подп. и дата	
Инд. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

ПГУ 2 11.03.04. 015 МП

Лист

6

Копировал

Формат А4

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(Обязательное)
Презентация ВКР

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55



Пензенский государственный университет
Кафедра «Нано– и микроэлектроника»



Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений

Выполнил: студент группы
20ПД1 **Филатов Е.С.**
Научный руководитель:
профессор, д.т.н. **Цыпин Б.В.**



Постановка цели и задач исследования

Цель: разработать датчик малых абсолютных давления на основе модернизации и проектирования чувствительного элемента.

Задачи:

1. Провести исследование тонкопленочных датчиков абсолютного давления.

Назначение датчика — измерение абсолютного давления жидких и газообразных агрессивных и неагрессивных сред и преобразование его в электрический сигнал.

2. Разработать датчик малых абсолютных давлений на основе модернизации чувствительного элемента

Параметры разработки:

- Проектирование тензорезистора формы «меандр» с заданным сопротивлением $R = 750 \pm 50 \text{ Ом}$;
- Расчет топологии чувствительного элемента с применением спроектированных ранее тензорезисторов.



Актуальность работы

В составе современной электроники, средств автоматизации используются датчики различного назначения (давления, ускорения, силы и тп.). В ракетостроении, самолетостроении, робототехнике датчики давления применяются в составе систем управления.

Актуальность данной темы заключается в том, что растущие требования к повышению надежности радиоэлектронной аппаратуры ставят задачей постоянную модернизацию датчиков, в частности датчиков давления.

Разработка новых датчиков давления поможет одновременно улучшить их технические характеристики, повысить надежность аппаратуры, снизить стоимость изготовления.



Классификация ДПА по типу контролируемого параметра

4



Тип датчика	Тип контролируемого параметра
1	2
Датчики давления	Давление жидких и газообразных сред
Акселерометры	Ускорения и упругие колебания
Датчики температуры	Температура
Датчики перемещения (движения)	Перемещение объекта
Датчики акустики	Звуковые давления
Датчики пульсации	Пульсации давления
Датчики оборотов	Число оборотов объекта
Датчики силы и тензорезисторы	Статико-динамические деформации, усилия (такие как растяжение и сжатие)
Датчики тока	Ток
Переключатели	Контроль положения объекта





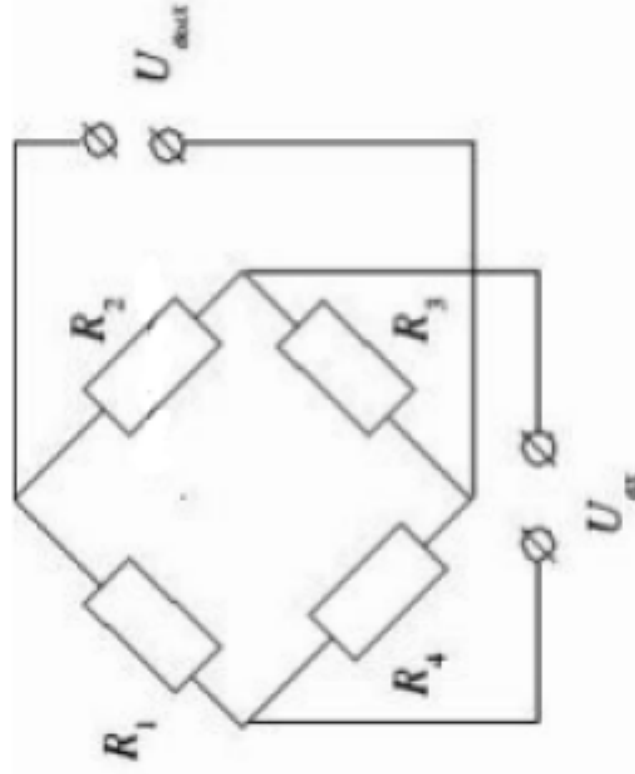
Тензорезистивный датчик

5

Конструкция тензорезистивного датчика построена на тензорезисторах, формирующих собой тензометрический мост (тензомост). Тензорезистивные датчики имеют упругий элемент, который деформируется при приложении силы.

Электрическое сопротивление материала пропорционально изменяется по мере изменения его структуры. При изменении давления колебания сопротивления и показания напряжения принимаются за электрические сигналы. Затем они калибруются в соответствии с эквивалентными показаниями давления и отображаются датчиком.

Тензисторические датчики особенно удобны для задач долгосрочного мониторинга. Они являются наиболее часто используемым типом датчиков из-за их доступности и универсальности.





Требования к датчикам абсолютных давлений

6

Условия эксплуатации датчиков давления таковы, что на них кроме давления измеряемой среды могут воздействовать нестационарные температуры с градиентами до сотен градусов, а также вибрация и удары.

Датчики давления должны соответствовать следующим требованиям:

- а) работоспособность в диапазоне температур измеряемой среды от криогенной до +100 градусов по Цельсию;
- б) стойкость к термоударам и механическим ударам;
- в) минимальное значение погрешности выходного сигнала в условиях воздействия комплекса дестабилизирующих факторов;
- г) стабильность метрологических характеристик во времени.

В технологии измерения давления различают три типа давления — абсолютное давление, относительное давление и дифференциальное давление. Абсолютное давление всегда относится к абсолютному вакууму как к нулевой точке.



Технологический маршрут изготовления чувствительного элемента

7

Одним из основных этапов разработки датчика давления является изготовление ЧЭ. Для данного этапа выработан определенный технологический маршрут изготовления, который можно поделить на следующие шаги:

- а) изготовление упругого элемента и полировка его воспринимающей поверхности (подложки);
 - б) подготовка (очистка) воспринимающей поверхности ЧЭ перед нанесением тонкой изолирующей пленки;
 - в) нанесение изолирующей тонкой пленки с заданными электрофизическими параметрами на воспринимающую поверхность металлического ЧЭ;
 - г) нанесение тонкой резистивной пленки;
 - д) нанесение тонкой проводящей пленки;
 - е) формирование топологического рисунка тензоомоста на ЧЭ;
 - ж) термообработка сформированной схемы;
- з) сборка модуля измерительного и датчика в целом

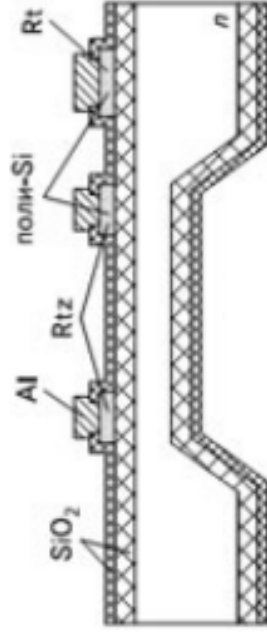
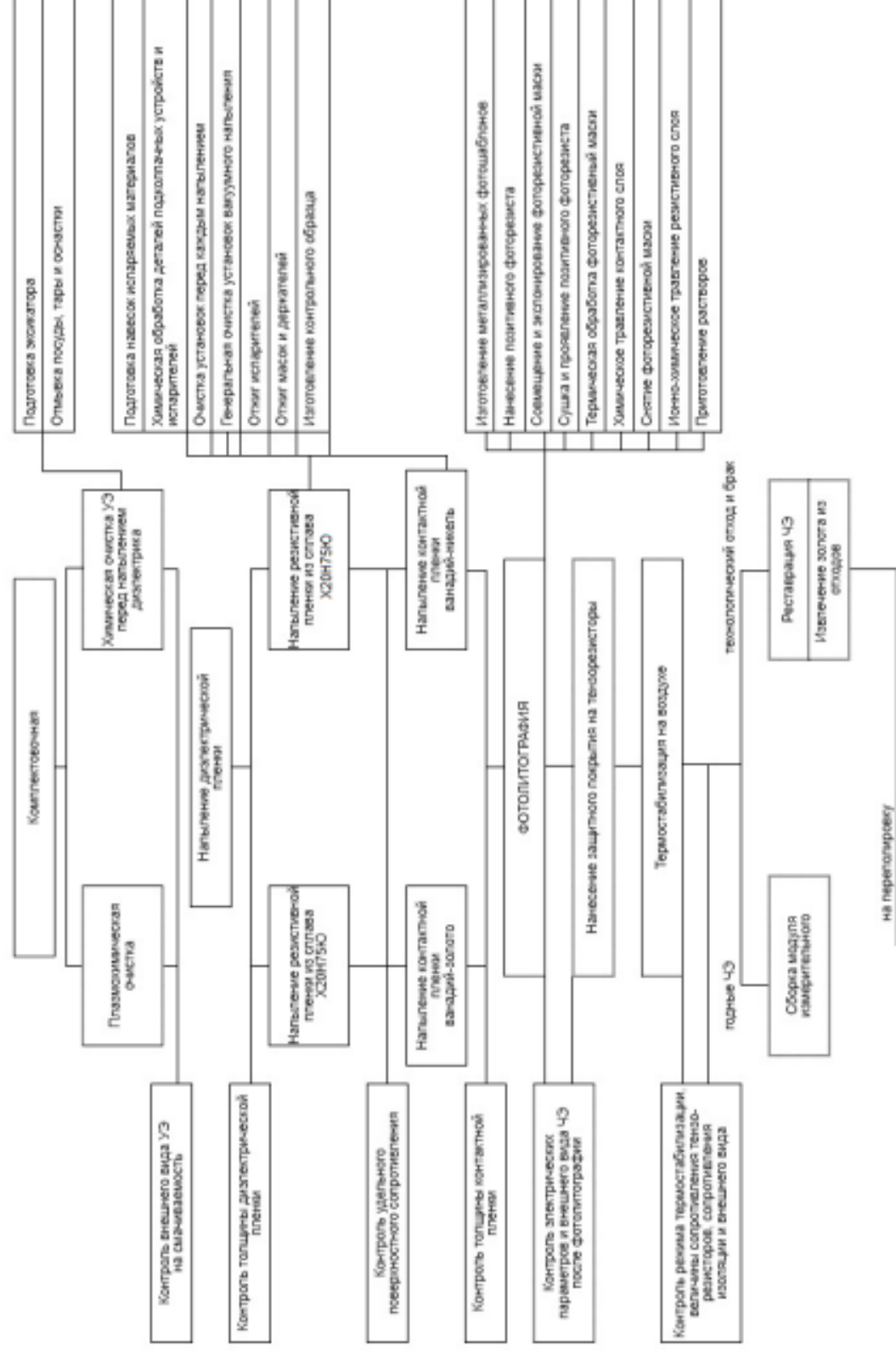




Схема технологического процесса формирования тонкопленочной структуры на ЧЭ датчика





Критерии выбора материала ЧЭ

9

При выборе материала чувствительного элемента необходимо обеспечить:

- а) высокие стабильные упругие свойства во всем рабочем интервале температур;
- б) максимальную чувствительность при минимальных габаритах;
- в) линейность упругих характеристик;
- г) высокую сопротивляемость микропластических деформаций после многократных нагрузок, исключаящие такие отрицательные явления, как гистерезис, упругие последствия ползучести, релаксация напряжений;
- д) однородность структуры материала мембраны;
- е) полируемость до шероховатости $Rz0,05$, в том числе с использованием электро-химико-механического метода полирования;
- ж) хорошую свариваемость со смежными деталями;
- з) коррозионную стойкость в агрессивных средах и химических реакциях.





Свойства инварных и элинварных сплавов, используемых в качестве материала упругого элемента

Наименование сплава	Плотность, ρ , г/см ³	ТКЛР, $\alpha \times 10^6$, 1/град	Модуль упругости, E , ГПа	Предел упругости, $\sigma_{\text{упр}}$, МПа	ТКМУ, $\beta \times 10^6$, 1/град
1	2	3	4	5	6
36НХТЮ	7,8	12,0-14,0	180	650-750	200-250
44НХТЮ	8,1	8,0	177-181	680-700	30
37НВКТЮ	8,0	8,3-8,6	158-160	700-750	-60...+100
70НХБМЮ	8,3	11,4-14,5	215	785-900	260
29Н26КХТБЮ	8,2	8,5	160-180	700	$\pm (10-30)$
36НКВХБТЮ (ВУС-22)	8,6	8,6-9,0	190-192	900-950	± 5



Слои тонкопленочной структуры на ЧЭ

Номер слоя	Наименование слоя	Материал слоя		Метод нанесения слоя	Толщина слоя, мкм	Удельное сопротивление, Ом/кВ
		Наименование, марка	ГОСТ, ТУ			
1	Диэлектрический	Хром	ТУ 14-22-50-91	Нанесение в вакууме	0,2-0,3	—
		электролитический ЭРХ-1			2,2-2,5	
		Кремний (II) оксид (кремний монооксись) ХЧ, тип А, фракция 2	ТУ 6-09-17-225-88		1,0-1,3	
2	Резистивный	Стекло кварцевое КУ-1	ГОСТ 15130-86		—	70
3	Проводящий	Сплав Х20Н75Ю-ВИ	ТУ 14-222-67-76		—	200-250
		Ванадий ВНЦл-1	ТУ 48-4-373-76		1,4-1,7	0,025-0,1
		Золото Зл 99,99	ГОСТ 7222-75			



Расчет тензорезистора

В качестве тензорезистора был выбран и рассчитан трехполосковый резистор с заданным номинальным сопротивлением $R = 715 \text{ Ом}$ и поверхностным сопротивлением $\rho_s = 55 \text{ Ом/кв.}$

Тензорезистивный материал — сплав Х20Н75Ю-ВИ.

$$K\phi = \frac{R}{\rho_s} = \frac{715}{55} = 13.$$

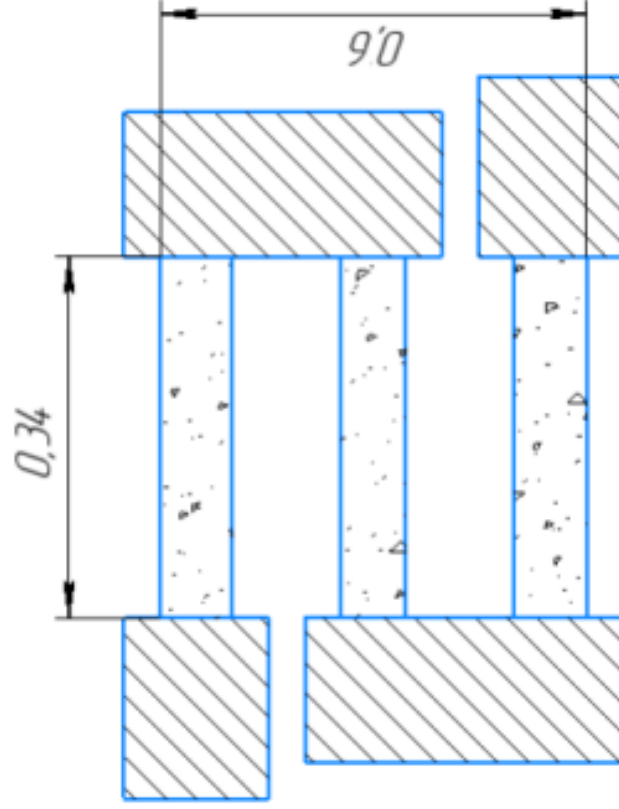
$$l_{cp} = K\phi \cdot b = 13 \cdot 0.1 = 1.3 \text{ мм.}$$

$$t = a + b = 0.1 + 0.1 = 0.2.$$

$$n = \sqrt{\frac{l_{cp}}{t}} = \sqrt{\frac{1.3}{0.2}} = 2.55$$

$$L = n \cdot t = 3 \cdot 0.2 = 0.6$$

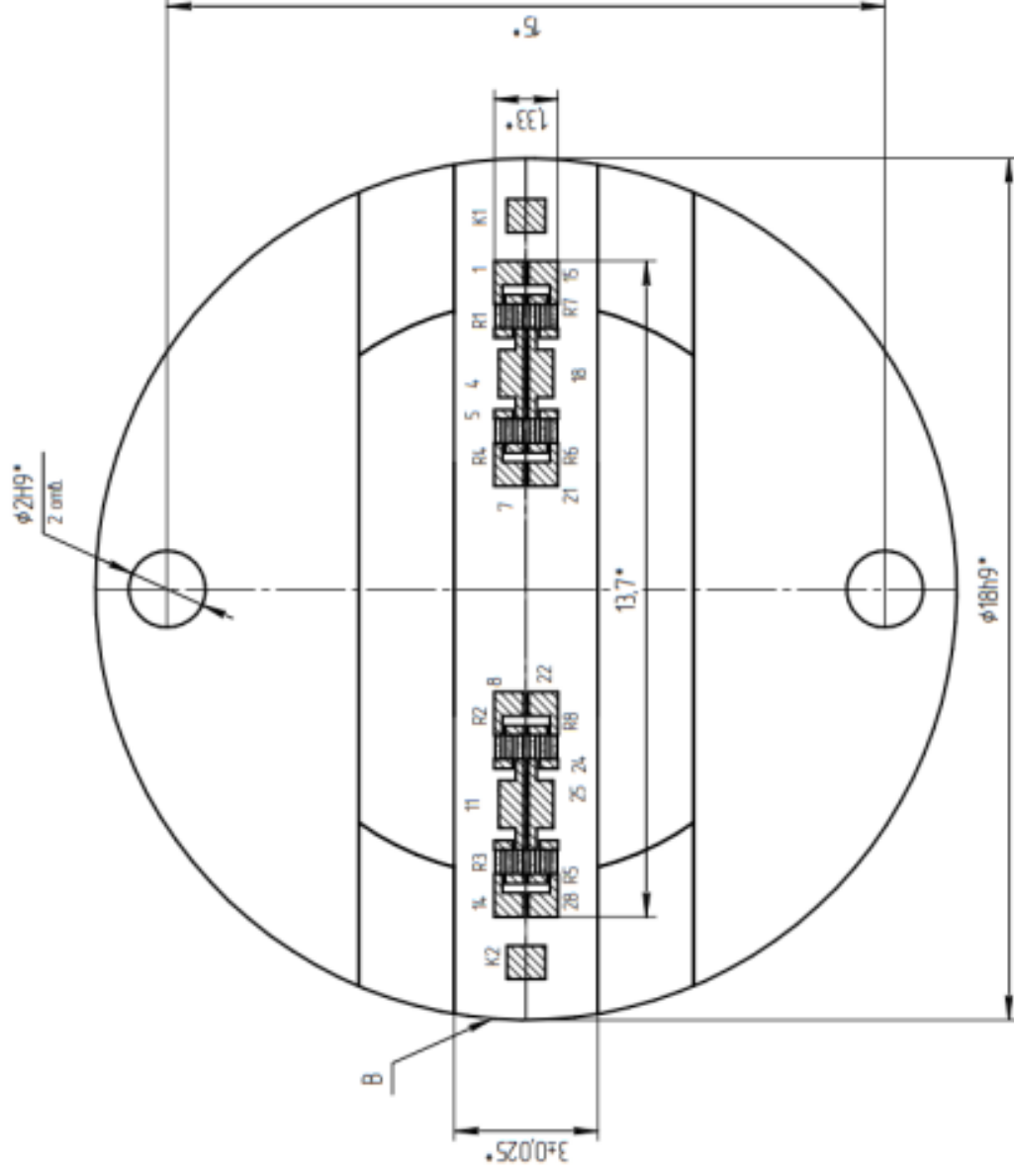
$$B = \frac{(l_{cp} - a \cdot n)}{n} = \frac{1.3 - 0.1 \cdot 3}{3} = 0.333 \text{ мм.}$$





Разработка топологии ЧЭ

13



На основе имеющегося датчика давления разработан новый датчик путем модернизации чувствительного элемента.

Личный вклад в разработку топологии — были разработаны два измерительных моста с спроектированными по ходу выполнения работы трехполосковыми тензорезисторами в количестве восьми штук вместо одного измерительного моста с четырьмя тензорезисторами простой формы, что позволило улучшить параметры чувствительного элемента и самого датчика.



Расчет освещенности лаборатории

Лаборатория, в которой проводилось проектирование датчика абсолютного давления, имеет размеры: $a = 8$ м; $b = 8$ м; $H = 4$ м. Высота рабочих столов, находящихся в лаборатории и применяемых работниками при проектировании $h_{рс} = 0,8$ м.

Количество рядов светильников равно 2.

Так как в светильнике типа ЛВО-4х18-CSVT применяются лампы мощностью 6 Вт, можно выбрать лампы типа ЛЛ 18Вт L18W/765 со световым потоком $\Phi_{л} = 1050$ лм.

$$E_p = \frac{E \cdot \Phi_{л \cdot n_{л \cdot 2}}}{\Phi_p} = \frac{300 \cdot 1050 \cdot 7 \cdot 2}{2.717 \cdot 10^4} = 162.311 \text{ лм};$$

$$\delta = \frac{E_p - E}{E} \cdot 100\% = \frac{162.311 - 300}{300} \cdot 100\% = -0.459\%.$$

Рабочее место соответствует требованиям по освещенности, отклонение расчетной освещенности от нормируемой не превышает допустимые пределы от +20% до -10%.



Заключение

В ходе данной работы был проведен анализ современной датчиковой аппаратуры, в частности датчиков давления и их чувствительных элементов.

Анализ полученных результатов помог подробнее разобраться в целях применения датчиков давления, принципе работы и технологических процессов изготовления. Рассмотрены чувствительные элементы, являющиеся одной из важнейших составных частей датчиков давления.

Разработана топология чувствительного элемента для изготовления датчика малых абсолютных давлений с четырьмя полосковыми тензорезисторами формы «меандр».

Рассчитана освещенность лаборатории, в которой проводилось проектирование датчика давления.

Реализация результатов исследовательских работ позволит создать датчик малых абсолютных давлений с металлопленочным чувствительным элементом тензорезистивного типа с улучшенными функциональными возможностями.



Спасибо за внимание!

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(Обязательное)

Заявление и протокол проверки ВКР на оригинальность в системе
«Антиплагиат. ВУЗ»

					ПГУ 2. 11.03.04 015 ПЗ	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Ректору Пензенского
государственного университета
А. Д. Гулякову
студента 4 курса
очной формы обучения
Филатова Егора Сергеевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Филатов Егор Сергеевич, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 11.04.04 Электроника и нанoeлектроника, профиль «Нано- и микроэлектроника», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.

Студент  Филатов Е.С.

ВКР представлена на проверку 17.06.24

Руководитель ВКР  Цыпин Б.В.

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной
бакалаврской работы на тему «Исследование и разработка датчиков малых
абсолютных давлений»

студента 4 курса Филатова Егора Сергеевича

направления подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»,

профиль «Нано- и микроэлектроника»

Руководитель ВКР Цыпин Б.В.



СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Филатов Егор Сергеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Филатов Егор Сергеевич
Название работы: Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра «Нано- и микроэлектроника»

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ. НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕН РЕЗУЛЬТАТ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	28.92%	СОВПАДЕНИЯ	28.92%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.08%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.08%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2024 11:45

«17» 06 2024 год

подпись

Б.В. Цыпин
И.О. Фамилия

СПРАВКА

Пензенский государственный университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Филатов Егор Сергеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Филатов Егор Сергеевич
Название работы: Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: Кафедра "Нано- и микроэлектроника"

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	28.92%	СОВПАДЕНИЯ	28.92%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.08%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	71.08%
ЦИТИРОВАНИЯ	0%	ЦИТИРОВАНИЯ	0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 17.06.2024

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 17.06.2024 11:45

Структура документа: Проверенные разделы: титульный лист с.1, основная часть с.2-32
Модули поиска: СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Библиография; Переводные заимствования*; ИПС Адилет; Коллекция НБУ; Шаблонные фразы; Цитирование; СМИ России и СНГ; IEEE; Перефразирование по коллекции IEEE; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Диссертации НББ; Публикации eLIBRARY; Кольцо вузов; Патенты СССР, РФ, СНГ; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Перефразирование по Интернету (EN); Перефразирование по Интернету; Публикации РГБ; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирование); СПС ГАРАНТ: аналитика; Медицина; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Сводная коллекция ЗБС; Переводные заимствования

Работу проверил: Головяшкин Алексей Николаевич

ФИО проверяющего

Дата подписи:

17.06.24



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет

Отчет на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОТЗЫВ

РУКОВОДИТЕЛЯ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

на выпускную квалификационную работу

Филатова Егора Сергеевича

Тема выпускной квалификационной работы Филатова Егора Сергеевича
«Исследование и разработка датчиков малых абсолютных давлений».

Актуальность данной темы вызвана тем, что развитие датчиковой аппаратуры затрагивает многие сферы нашей жизни, так как сами датчики применяются в качестве составной части большого количества электронных приборов, в том числе и государственной важности. Разработка новых видов датчиков давления направлена на улучшение их параметров и их удешевление.

В ходе выполнения ВКР студент Филатов Е.С. продемонстрировал высокий уровень освоения компетенций, связанных с данной темой, а также с основными областями профессиональной деятельности: проектно-конструкторской и производственно-технологической. За время работы над ВКР студент изучил особенности проектирования датчиков давления и их чувствительных элементов в частности, разработал тензорезистор типа меандр и на его основе рассчитал топологию измерительного моста.

Студент Филатов Е.С. проявил себя грамотным специалистом, способным решать конкретные поставленные задачи на высоком техническом уровне.

На основании вышеизложенного считаю, что ВКР заслуживает оценки «отлично», а сам Филатов Егор Сергеевич достоин присвоения ему квалификации бакалавра по специальности 11.03.04. «Электроника и нанoeлектроника».

Руководитель ВКР, профессор кафедры «РКАП», д.т.н.

 Цыпин Б.В.