М 405835

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ЕВДОКИМОВ Владимир Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СО СТРУКТУРОЙ „КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ“ И СОЗДАНИЕ НА ИХ ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ДАВЛЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Специальность 05.13.05
Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва — 1982

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском институте теплоэнергетического приборостроения.

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент **С. М. Заседателев.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Б. И. Белов,**
кандидат технических наук, **Р. С. Брехов.**

Ведущее предприятие: Московское производственное объединение «Манометр»

Защит[ита] [ноя]бря 1982 г.

в 14 час. [засе]дании совета К.053.15.06 Москов[ского] [Ор]ена Революции и ордена Трудового [Крас]ного Знамени училища имени Н. Э. Бау[мана] по адресу: Бауманская ул., д. 5.

С дис[сертацией] [мож]но ознакомиться в библиотеке института.

М405835

специ[ализированного]
кандидат[ского совета] **В. И. Лобачев**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Основой экономического роста, как отмечено 26 съездом КПСС, является дальнейшая интенсификация производства, что в свою очередь предполагает всемерное развитие и внедрение промышленных систем управления технологическими процессами (СУ ТП). В настоящее время такие системы уже внедряются в различных отраслях народного хозяйства, например, в теплоэнергетике, металлургической и химической промышленности. Однако их эффективность и применение сдерживается из-за отсутствия необходимого комплекса современных средств измерительных преобразователей давления (ИПД), наиболее распространенных средств измерений.

Выпускаемые в настоящее время серийные преобразователи давления ГСП с силовой компенсацией, индуктивные с компенсацией магнитных потоков и т.д. не всегда отвечают возросшим требованиям в отношении надежности, точности, стабильности, быстродействия предъявляемым к СУ ТП.

Одним из наиболее перспективных направлений в решении данной задачи является создание ИПД на базе тензопреобразователей с полупроводниковыми тензочувствительными схемами. Исследуемые в настоящей работе тензорезисторные ИПД общепромышленного назначения обладают достаточно высокой точностью 0,2-1,0%. Однако они не всегда удовлетворяют требованиям обеспечения долговременной стабильности, работы в широком диапазоне температур окружающей среды, измерения малых и средних давлений с высокой точностью-основным требованиям, предъявляемым к ИПД промышленными системами управления.

В этой связи повышение чувствительности с обеспечением высокой стабильности и точности тензопреобразователей и создание на их основе общепромышленных измерительных преобразователей малых и средних давлений для СУ ТП с улучшенными технико-экономическими и эксплуатационными характеристиками является актуальной проблемой.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью настоящей диссертационной работы является разработка высокостабильных тензопреобразователей давления и силы со структурой "кремний на сапфире" (КНС-структур), исследование и разработка на их основе измерительных преобразователей малых и средних давлений, предназначенных для использования в промышленных системах управления технологических

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана 1405835 Евдокимов В.И. Исследование

Т403 835

процессов в различных отраслях народного хозяйства, исследования способов температурной компенсации, обеспечивающих работу ИПД в широком диапазоне рабочих температур.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для решения поставленных задач в работе используются теория пьезорезисторного эффекта в полупроводниках, теория упругости для изотропных материалов и тензорный анализ. Исследования метрологических характеристик тензопреобразователей и ИПД проводились экспериментальным методом. Надежность и стабильность характеристик тензопреобразователей и ИПД проверялась по результатам их лабораторных и промышленных испытаний. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались методами математической статистики.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ. Исследовано влияние сдвигового коэффициента тензочувствительности второго рода K_{I6} и сдвиговых деформаций на чувствительность гетероэпитаксиальных кремниевых тензорезисторов, расположенных на мембранных упругих элементах. Предложен и исследован мембранно-рычажный тензопреобразователь силы. Установлены и исследованы зависимости чувствительности ИПД от параметров упругой системы и тензопреобразователей. Предложена и исследована система ИПД на основе эффекта гидравлического усиления; получены зависимости, позволяющие разрабатывать ИПД с максимальной чувствительностью и минимальной температурной погрешностью. Исследован способ компенсации температурной составляющей аддитивной погрешности тензорезисторных ИПД.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ. Разработаны тензопреобразователи на основе КНС-структур для измерения давлений и усилий, отличающиеся высокой чувствительностью и точностью. Разработан технологический процесс пайки КНС-структуры со сплавами титана, обеспечивающий высокую стабильность характеристик во времени, циклическую прочность, практически отсутствие гистерезиса и работу в широком диапазоне температур. Раскрыты принципиально новые возможности повышения чувствительности как тензопреобразователей, так и ИПД. Разработаны тензочувствительные схемы на КНС-структурах. Разработаны конструкции ИПД на основе тензопреобразователей для измерения средних и малых давлений.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты выполненных в диссертационной работе исследований были использованы при создании:

- КНС-структур, выпускаемых серийно на одном из предприятий Министерства цветной металлургии;

- полупроводниковых преобразователей избыточного давления "Кристалл", выпускаемых на ПО"Теплоконтроль" (г.Казань);

- комплексов полупроводниковых преобразователей абсолютного, избыточного, гидростатического давлении, разности давлений, разряжения, избыточного давления-разряжения "Сапфир" и "Сапфир-22", выпускаемых серийно на Ивано-Франковском приборостроительном заводе (г.Ивано-Франковск), НПО"Манометр" (г.Москва).

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основное содержание и результаты работы были доложены:

- на пяти Всесоюзных научно-технических конференциях в 1973, 1976-79г.г. (основные из них приведены в перечне работ);

- на Московской конференции "Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники", Москва, 1980г.;

- на заседании кафедры ЭПУ МВТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 1978г., 1981г.;

- на Научно-техническом совете Государственного научно-исследовательского института теплоэнергетического приборостроения, Москва, 1981.

ПУБЛИКАЦИЯ. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 19 печатных работ, в том числе получены два авторских свидетельства.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 149 страницах машинописного текста, содержит 32 таблицы, 81 рисунок, список литературы 154 наименований и приложения.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ следующие основные положения работы:

1. Повышение чувствительности ИПД за счет использования сдвиговых деформаций и учета сдвигового коэффициента тензочувствительности в тензопреобразователях на основе КНС-структур, выбора схемы и оптимизации параметров упругой системы ИПД.

2. Применение тензопреобразователей с двухслойным чувствительным элементом (ЧЭ) на основе КНС-структур для создания высокостабильных преобразователей давления и силы, отличающихся высокой чувствительностью, высокими метрологическими характеристиками.

3. Решение задачи уменьшения температурной погрешности ИПД:

- применением упругой системы ИПД, в которой, в отличие от существующей, применена дополнительная мембрана и жидкость;

- путем коррекции температурной погрешности мостовой схемы с четырьмя полупроводниковыми тензорезисторами с помощью трех температурно-стабильных резисторов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В главе I приведен обзор и анализ литературного материала по исследованиям и разработкам тензорезисторных ИПД. Установлено, что серийно выпускаемые промышленностью ИПД ГСП (с силовой компенсацией, индуктивные, с компенсацией магнитных потоков) не отвечают современным требованиям предъявляемых к СУ ТП промышленных производств в обеспечении точности, надежности, стабильности, коррозионно-стойкости и.т.д. Показано, что одним из наиболее перспективных направлений в решении данной задачи является создание ИПД на базе тензопреобразователей с КНС-структурами. Это обусловлено тем, что в них сочетаются одновременно все преимущества, характерные для структур "кре. ний на кремнии" и "металл-диэлектрик-металл"- это высокая чувствительность, высокая стабильность и воспроизводимость характеристик, отсутствие р-п перехода и возможность работы в широком диапазоне температур.

Исследования, проводимые в НИИТеплоприборе с 1968г., а также результаты работ В.С.Папкова, М.С.Суровикова, И.И.Смыслова, А.П.Сгибова, М.Е.Ксенофонтова и др. по созданию преобразователей давления на основе КНС-структур, подтвердили перспективность их использования. Было предложено использовать КНС-структуру с ориентацией $\{100\}Si/\{1012\}Al_2O_3$ р-типа проводимости, с удельным сопротивлением ρ = 0,002- 0,02 Ом.см.

Анализ известных литературных источников по тензоэффекту в полупроводниках показал, что наряду с высоким продольным коэффициентом тензочувствительности (КТЧ) полупроводниковые тензорезисторы обладают высоким поперечным КТЧ, влияние которого учитывают при определении относительного изменения сопротивлен.я тензорезисторов. Однако влияние сдвиговых деформаций на чувствительность тензорезисторов в мембранных упругих элементах не рассматривалось.

В работе показано, что диапазон измеряемых давлений ИПД в области малых давлений ограничен как чувст.ительностью тензопреобразователя, так и параметрами упругой системы. Поэтому должны быть обеспечены эффективные способы повышения чувстви-

тельности упругих систем.

Характеристики тензопреобразователя зависят в основном от способа крепления КНС-структуры к корпусу. Установлено, что наиболее приемлемым способом соединения монокристаллической сапфировой подложки с металлом является пайка в вакууме по активной технологии.

Для преобразователей с полупроводниковыми тензорезисторами характерным является большая температурная погрешность. Исследованию и разработке способов компенсации температурных погрешностей преобразователей посвящено большое число научных работ. В том числе в трудах А.И.Удалова, Б.С.Трухачева, А.А.Сгибова и др. исследован ряд способов компенсации температурной погрешности мостовых схем с тензорезисторами с помощью пассивных и термозависимых сопротивлений. Коррекция аддитивной составляющей температурной погрешности мостовых схем с 4-мя тензорезисторами и расчет, как правило, проводились из условия равенства температурных коэффициентов сопротивлений (ТКС) противоположных плеч моста. Принятие такого допущения снижало точность коррекции.

Поэтому для достижения цели, поставленной в настоящей работе, необходимо было решить следующие основные задачи:

- исследовать чувствительность тензорезисторов в мембранных тензопреобразователях с КНС-структурой;
- исследовать влияние сдвиговых деформаций на чувствительность тензорезисторов в мембранных тензопреобразователях;
- выявить и проанализировать параметры, определяющие чувствительность упругих систем ИПД с тензопреобразователями;
- исследовать соединения КНС-структуры с титановыми сплавами с помощью высокотемпературной пайки в вакууме;
- исследовать способы по коррекции температурной погрешности;
- разработать тензочувствительные схемы и тензопреобразователи на основе КНС-структур, исходя из обеспечения высокой чувствительности, стабильности и малой температурной погрешности;
- разработать ИПД с тензопреобразователями на основе КНС-структур и экспериментально исследовать их характеристики.

В главе 2 приведены результаты исследований чувствительности тензорезисторов, расположенных на поверхности мембранных упругих элементов с КНС-структурами.

Приведены результаты исследований характеристик тензопреобразователей мембранного и мембранно-рычажного типа. Приведены теоретические и экспериментальные исследования упругих систем- двухмембранного преобразователя давления, тензорезисторного преобразователя с гидроусилителем (с учетом температурной погрешности), тензорезисторного преобразователя мембранно-рычажного типа.

В работе проведены исследования, которые позволили получить зависимости величин продольного K_{II}, поперечного K_{I2} и сдвигового K_{I6} коэффициентов тензочувствительности в произвольном направлении для кремния р-типа проводимости в кристаллографических плоскостях $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$.

Экспериментально установлено, что для тензорезисторов с ориентацией $\{100\}Si/\{1012\}Al_2O_3$ коэффициенты K_{II}, K_{I2} меньше на 25% и K_{I6} больше на 20%, чем расчетные значения коэффициентов K_{II}, K_{I2} и K_{I6} для объемного кремния. Определены значения коэффициентов K_{II}, K_{I2}, K_{I6} для кремния р-типа с $\rho = 0{,}02$ Ом·см и $\rho = 0{,}003$ Ом·см

В работе предложен и исследован мембранно-рычажный тензопреобразователь силы с силовоспринимающим рычагом, расположенным в центре мембраны. Показано, что при отношении толщины мембраны h к длине рычага ℓ менее 0,05 силой, действующей в плоскости мембраны, можно пренебречь, и деформированное состояние оценивать только от действия изгибающего момента $M=Q\ell$, приложенного в центре мембраны. Исследованы зависимости компонент деформаций и угла поворота жесткого центра от параметров мембраны. Построена номограмма для определения толщины металлической мембраны h и угла поворота ψ жесткого центра в зависимости от приложенного момента.

В работе получены зависимости, позволяющие определить относительное изменение сопротивления $\frac{\Delta R}{R}$ тензорезисторов с произвольной ориентацией и их произвольным расположением на поверхности КНС-структуры для мембранных тензопреобразователей при воздействии нагрузки.

Для преобразователя с плоской мембраной

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Sigma} = A\left[K_{II}\left(1-2\frac{r^2}{R_M^2}-\frac{r^2}{R_M^2}\cos 2\alpha\right)+K_{I2}\left(1-2\frac{r^2}{R_M^2}+\frac{r^2}{R_M^2}\cos 2\alpha\right)-2K_{I6}\frac{r^2}{R_M^2}\sin 2\alpha\right], \quad (1)$$

где, в свою очередь, $A=\frac{2PR_M}{16D}$

Для преобразователя мембранного с жестким центром

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_I = A'\left[K_{11}\left[\frac{r^2}{R_M^2} + 2\frac{r^2}{R_M^2}\cos^2\alpha - \frac{r_0^2}{r^2}\cos 2\alpha - \left(1+\frac{r_0^2}{R_M^2}\right)\right] + K_{12}\left[\frac{r^2}{R_M^2} + 2\frac{r^2}{R_M^2}\sin^2\alpha + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{r_0^2}{r^2}\cos 2\alpha - \left(1+\frac{r_0^2}{R_M^2}\right)\right] + 2K_{16}\left(\frac{r^2}{R_M^2} - \frac{r_0^2}{r^2}\right)\sin 2\alpha\right\}, \qquad (2)$$

Для мембранно-рычажного тензопреобразователя

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_I = A''\left[K_{11}\left[\frac{R_M^2+r_0^2}{R_M r_0} - \frac{2r}{R_M}\cos^2\alpha - \frac{r}{R_M} + \frac{r_0^2 R_M}{r^3}\cos 2\alpha\right] + K_{12}\left[\frac{R_M^2+r_0^2}{R_M r_0} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - 2\frac{r}{R_M}\cos^2\alpha - \frac{r}{R_M} - \frac{r_0^2 R_M}{r^3}\cos 2\alpha\right] - 2K_{16}\left(\frac{r}{R_M} - \frac{r_0 R_M}{r^3}\right)\sin 2\alpha\right\}\cos\theta, \qquad (3)$$

где, в свою очередь, $A'' = \dfrac{Mz}{4\pi\left(1+\frac{r_0^2}{R_M^2}\right)D}$,

где r_0 – радиус жесткого центра, R_M – радиус мембраны, r – текущий радиус, z – расстояние поверхности КНС-структуры от нейтральной поверхности изгиба мембраны, P – измеряемое давление, $M=Ql$ – изгибающий момент, α – угол между осью X и направлением главных деформаций, D – цилиндрическая жесткость двухслойной мембраны, θ – угол между направлением вектора нагрузки и направлением главных деформаций.

Анализ уравнений (1)-(3)- показал, что максимальной чувствительностью обладают тензорезисторы, расположенные на внешнем и внутреннем контурах мембран тензопреобразователей.

Выявлено, что крутизна кривой приведенной чувствительности у жесткого центра мембран выражена сильнее, чем необходимо учитывать при проектировании тензочувствительной схемы.

В работе впервые показано, что сдвиговый коэффициент тензочувствительности при наличии сдвиговых деформаций в тензорезисторе, характеризующихся углом α, существенно изменяет чувствительность тензорезисторов, расположенных на мембране. Так, для тензорезисторов из кремния p-типа проводимости на сапфировой подложке с ориентацией $\{100\}Si/\{\bar{1}012\}Al_2O_3$ основной вклад в изменение относительного изменения сопротивления которых вносит продольная деформация, наличие сдвиговых деформаций позволяет повысить чувствительность тензорезисторов на 12,5% по сравнению с тензорезисторами, ориентированными в направлениях максимальной тензочувствительности <110>. Учет сдвиговых деформаций и коэффициента сдвиговой тензочувствительности K_{16} позволяет также значительно расширить область с

высокой чувствительностью и практически использовать весь контур мембраны, где можно располагать тензорезисторы.

Установлено, что зона с максимальной чувствительностью для тензорезисторов, ориентированных в направлении <110>, и положение которых на контуре определяется углом α, значительно шире, чем для тензорезисторов, у которых направление ориентации совпадает с направлением главных деформаций.

С целью проверки правильности полученных выражений были проведены экспериментальные исследования относительного изменения сопротивления тензорезисторов $\frac{\Delta R}{R}$ на поверхности мембранных тензопреобразователей с ИНС-структурами. В основу проведенных исследований были положены измерения изменения сопротивлений тензорезисторов преобразователей под действием давления или силы. Измерение сопротивлений тензорезисторов проводилось компенсационным методом.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических зависимостей, полученных в данной работе. Средние значения $\frac{\Delta R}{R}$ близки к расчетным (расхождение не превышало 6%). Эксперимент также показал, что $\frac{\Delta R}{R}$ тензорезисторов, расположенных на поверхности мембраны за контуром ее закрепления, не равно нулю. Установлено, что деформации распределяются на поверхности мембраны за пределы ее контура закрепления на расстоянии до (0,05÷ 0,4) радиуса мембраны в зависимости от толщины мембраны.

На основе проведенных исследований были разработаны тензочувствительные схемы, обеспечивающие максимальную чувствительность, минимальную нелинейность и температурную погрешность.

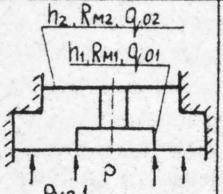
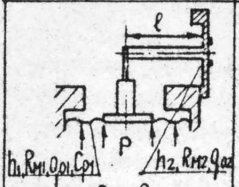
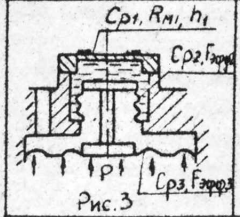
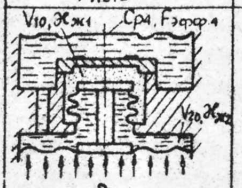
В работе показано, что повышение чувствительности тензорезисторных ИПД можно обеспечить также и за счет оптимизации параметров упругих систем и тензопреобразователей.

Исследованы мембранные тензопреобразователи при их нагружении силой, изгибающим моментом в центре мембраны и давлением в комплексе с упругой системой, которая создает эту нагрузку. Принципиальные схемы и основные соотношения представлены в табл. I.

Поскольку упругие системы ИПД обладают жесткостью, были проведены исследования по влиянию параметров упругой системы и тензопреобразователя на чувствительность ИПД. Получены зависимости,

Таблица I

Принципиальные схемы и основные соотношения упругих систем ИПД

Тип упругой системы	Расчетные соотношения
 Рис.1	$P=\frac{4h_2^2}{3R_м^2}\frac{E\varepsilon_{q02}}{i}$; $i=\frac{(1+q_{01}^2)\left(\frac{2\ell n\rho_{02}}{q_{02}^2-1}-1\right)}{1+\gamma\frac{A_{Q_1}}{A_{Q2}}}$; $\gamma=\frac{h_1^3E_1R_{м1}^2}{h_2^3E_2R_м^2}$; $A_{Q_j}=\frac{3(1-\nu^2)\left[(1-q_{0j}^2)^2+4q_{0j}^2\ell n^2q_{0j}\right]}{2\pi(1-q_{0j}^2)}$
 Рис.2	$P=\frac{2\pi R_{м2}D_2\varepsilon_{q2}\left[1+\left(\frac{r_0}{R_{м2}}\right)^2\right]\frac{r_0}{R_{м2}}\left[1+C_{p1}\left(\frac{\ell^2A_\psi}{12(1-\nu^2)D_2}+\frac{\ell^3}{3J_pE}\right)\right]}{z_2\ell\cos\theta F_{эфф1}\left[1-\left(\frac{r_0}{R_{м2}}\right)^2\right]}$ J_p - момент инерции поперечного сечения рычага
 Рис.3	$P=\frac{8E_1h_1^2\left(1-3\frac{r^2}{R_{м1}^2}\right)\varepsilon_1}{3(1-\nu_1^2)R_{м1}^2i}$; $i=\frac{F_{эфф3}/F_{эфф2}}{1+\frac{(C_{p2}+C_{p3})}{C_{p1}}\frac{F_{эфф1}}{F_{эфф2}}}$; $\delta P_T=V_{T_0}\frac{\partial\mathcal{Ж}-\partial\mathcal{К}}{\frac{F_{эфф1}}{C_{p1}}+\frac{F_{эфф2}}{C_{p2}+C_{p3}}}(T-T_0)$
 Рис.4	$i=\frac{F_{эфф3}/F_{эфф2}}{\left[1+\frac{(C_{p2}+C_{p3}+C_{p4})}{C_{p1}}\frac{F_{эфф1}}{F_{эфф2}}\right]}$; $\delta P_T=\frac{V_{10}\mathcal{Ж}_{ж1}\Delta T}{\frac{F_{эфф1}}{C_{p1}}+\frac{F_{эфф2}}{C_{p2}+C_{p3}}}-\frac{V_{20}\mathcal{Ж}_{ж2}\Delta T}{\frac{F_{эфф4}}{C_{p4}}+\frac{F_{эфф3}}{C_{p2}+C_{p3}}}$; $V_{20}=V_{10}\frac{\left(\frac{F_{эфф4}}{C_{p4}}+\frac{F_{эфф3}}{C_{p2}+C_{p3}}\right)\mathcal{Ж}_{ж1}}{\left(\frac{F_{эфф1}}{C_{p1}}+\frac{F_{эфф2}}{C_{p2}+C_{p3}}\right)\mathcal{Ж}_{ж2}(i-1)}$

где $\varepsilon_{q2}, \varepsilon_i$ - деформации на поверхности мембраны тензопреобразователя; E_j - модуль упругости, C_{pj} - жесткость по давлению; $F_{эффj}$ - эффективная площадь упругих элементов; $q_{0j} = r_0/R_{мj}$ - безразмерный параметр; V_{j0} - начальный объем, A_{qj}, A_ψ - коэффициенты, зависящие от q_{0j}; $\Delta T = T - T_0$ - изменение температуры; δP_T - температурная погрешность; ν - коэффициент Пуассона; $\mathcal{Ж}_ж, \mathcal{Ж}_к$ - коэффициенты объемного расширения жидкости и материала корпуса

позволяющие связать давление с параметрами упругой системы и деформированным состоянием тензопреобразователя. Показано, что чувствительность удобно оценивать через коэффициент передачи k. Установлено, что коэффициент передачи имеет максимум, величина которого зависит от параметров упругой системы и тензопреобразователя. Показано, что чувствительность двухмембранного тензорезисторного ИПД табл.I., (рис.I) при одинаковом отношении $h/R_м$ и давлении P может быть в 2-3 раза выше по сравнению с тензопреобразователем мембранного типа, а чувствительность ИПД с мембранно- рычажным тензопреобразователем табл.I, (рис.2) выше в 6-7 раз.

Для ИПД с мембранно-рычажным тензопреобразователем и ИПД с гидроусилителем табл.I,(рис.3) получены зависимости для определения оптимальной величины параметра, при котором обеспечивается максимальная чувствительность.

Показано, что температурная погрешность в ИПД с гидроусилителем, обусловленная наличием разделительной жидкости, существенно (в 2-5 раз) ограничивает диапазон измеряемых давлений.

С целью расширения диапазона измеряемых давлений и устранения температурной погрешности был предложен ИПД, принципиальная схема которого представлена в табл.I, (рис.4), получены выражения для определения коэффициента передачи и определены соотношения параметров упругой системы, при которых температурная погрешность может быть сведена к минимуму.

Экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических зависимостей. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает I2%.

В главе 3 приведены результаты исследований механической прочности, герметичности и стабильности соединения МИС-структуры с различными титановыми сплавами, полученного с помощью пайки в вакууме твердыми припоями.

Определен режим, при котором получаются наиболее высокие значения предела прочности σ =120÷ I30 кгс/мм^2. Металлографические исследования показали, что паяное соединение плотное, не имеет дефектов.

Поскольку из-за различия коэффициентов температурного расширения сапфира и титана после пайки в мембранных тензопреобразователях с однослойным ЧЭ в определенных случаях возможна

потеря устойчивости КНС-структуры, были определены конструктивные модификации тензопреобразователей, в которых КНС-структура потеряла устойчивость.

В целом результаты экспериментальных исследований, представленные в третьей главе, показали, что технология активной пайки КНС-структуры с металлическим упругим элементом из титана позволяет получить такие типы тензопреобразователей, которые обладают высокой механической прочностью (разрушение образцов происходило при деформациях $4\text{-}5 \cdot 10^{-3}$), высокой циклической прочностью, практически отсутствием гистерезиса, возможностью работы в широком диапазоне температур от -269 до 400 °С.

В главе 4 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований температурных характеристик тензопреобразователей с КНС-структурами и способ компенсации аддитивной температурной составляющей погрешности мостовых схем.

Температурные характеристики тензопреобразователей определяются характеристиками кремниевых тензорезисторов, а также существенно зависят от качества паяного соединения, выранного материала корпуса, конструктивного выполнения тензопреобразователя и топологии тензочувствительной схемы. Поэтому исследование всех факторов и их правильный учет при разработке тензопреобразователей является необходимым условием обеспечения высокой стабильности и высоких метрологических характеристик.

В работе исследовались температурные характеристики тензопреобразователей с однослойным ЧЭ с перемычкой и с двухслойным ЧЭ. Установлено и экспериментально подтверждено, что температурные характеристики тензопреобразователей с двухслойным ЧЭ практически аналогичны характеристикам КНС-структуры. В соответствии с результатами исследований рекомендовано для ИПД использовать тензопреобразователи с двухслойным ЧЭ.

Исходя из экспериментальных зависимостей ТКС тензорезисторов был предложен способ компенсации температурной составляющей аддитивной погрешности тензопреобразователей с КНС-структурой с помощью трех температурно стабильных резисторов. Показано, что включение трех температурно стабильных резисторов позволяет одновременно начальный небаланс мостовой схемы свести к нулю и существенно уменьшить температурную погрешность.

Получены выражения, позволяющие определить схему включения и вычислить величины компенсирующих и балансирующих резис-

торов для всех соотношений между сопротивлениями тензорезисторов и их ТКС. Экспериментальные исследования подтвердили правильность аналитических зависимостей и высокую сходимость с расчетными значениями (до 5%).

В главе 5 предложены конструкции и исследованы характеристики тензорезисторных измерительных преобразователей для измерения средних и малых давлений, тензопреобразователей, результаты эксплуатационных испытаний разработанных приборов.

Основным элементом тензопреобразователя является КНС-структура постоянной толщины со сформированной тензочувствительной схемой, в которой величина нулевого небаланса не превышает ±0,2-0,6% и обеспечивается с помощью последовательного включения кремниевых тензорезисторов, расположенных на КНС-структуре.

Разработаны и исследованы следующие модификации мембранных тензопреобразователей:

- с двухслойным ЧЭ, в котором КНС-структуры прикреплены к поверхности плоской металлической мембраны чашечного типа;
- с двухслойным ЧЭ, в которых КНС-структуры прикреплены к поверхности металлической мембраны с жестким центром;
- с двухслойным ЧЭ (мембранно-рычажный преобразователь), в котором КНС-структуры прикреплены к поверхности металлической мембраны с рычагом, закрепленным в центре.

Экспериментальные исследования элементов конструкции тензопреобразователей позволили выбрать такое конструктивное решение, которое обеспечивает высокую помехоустойчивость - практически полностью изолировать мембрану тензопреобразователя от каких-либо силовых воздействий со стороны штуцера, корпуса, возникающих как при сборке, так и при эксплуатации ИПД.

С целью проверки новых схемных конструктивных решений тензопреобразователей, измерительных блоков и ИПД, а также с целью проверки и уточнения их расчетов были проведены экспериментальные исследования метрологических характеристик, чувствительности и перегрузочной способности. При этом проводились измерения выходного сигнала преобразователей под действием давления или силы и температуры окружающей среды.
При измерениях в качестве образцовых и вспомогательных средств

использовались: грузопоршневые манометры класса точности 0,02; грузы образцовые второго разряда; потенциометры постоянного тока класса точности 0,015; источники стабилизированного напряжения класса точности 0,01; термостаты с точностью поддержания температуры $\pm 0,1^{\circ}C$.

Исследование мембранных тензопреобразователей давления с пределами измерения от 0-1 до 0-1000 кгс/см^2 (от 0-0,1 до 0-100 МПа) показало, что погрешность нелинейности у тензопреобразователей мембранных с жестким центром лежит в пределах 0,05-0,3%. Вариация выходного сигнала, вычисленная по средним значениям погрешности при увеличении и уменьшении сигнала, не превысила 0,04%.

Исследование приведенной погрешности мембранно-рычажных тензопреобразователей в диапазоне измеряемых сил от 0-0,4 до 0-10 кгс (от 0-4 до 0-100 Н) на 76 образцах показало, что погрешность нелинейности у 50% образцов не превысила 0,05%, у 30% образцов-0,1%, у 15% образцов не более 0,16%. Вариация выходного сигнала у всех образцов не превысила 0,03%. Погрешность температурного ухода нуля у 54% образцов не превысила 0,3% на $10^{\circ}C$ в диапазоне температур от -50 до $+80^{\circ}C$, при этом у 17% тензопреобразователей погрешность не превысила 0,1%. Диапазон изменения выходного сигнала составил 150-170 МВ при питании 5 В.

Показано, что погрешность нелинейности для мембранно-рычажного тензопреобразователя практически не зависит от изменения направления усилия, а выходной сигнал пропорционален косинусу угла θ, образуемого вектором приложения силы и продольной осью тензорезистора.

В главе также приводятся результаты экспериментальных исследований по стабильности мембранных тензопреобразователей давления и силы, которые подтверждают их высокую стабильность при воздействии: постоянной нагрузки в течение 18 тысяч часов, циклической нагрузки $2 \cdot 10^6$ циклов, знакопеременной нагрузки $5 \cdot 10^5$ циклов. Максимальному значению нагрузки деформация на ЧЭ соответствовала $\varepsilon = /1 \cdot 10^{-3}/$. Изменение нулевого значения выходного сигнала за весь период испытаний не превышало 0,1%.

На основе тензопреобразователей, разработанных и исследованных в работе, были созданы ИПД общепромышленного назначения

"Кристалл","Сапфир" и "Сапфир-22" с электрическим унифицированным выходным сигналом на пределы измерения от 0-0,00025 до 0-100 МПа погрешностью 0,1, 0,25, 0,5% с широкими эксплуатационными возможностями. Показано, что использование в СУ ТП тензопреобразователей и ИПД повышает надежность и стабильность систем управления. Преобразователи давления "Кристалл"," Сапфир" и "Сапфир-22" успешно прошли Государственные приемочные испытания, занесены в Госреестр СССР и освоены в серийном производстве на заводах Минприбора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены исследования влияния сдвиговых деформаций на чувствительность гетероэпитаксиальных тензорезисторов из кремния р-типа проводимости в плоскости $\{100\}$. Впервые показано, что учет сдвигового коэффициента тензочувствительности K_{16} при наличии сдвиговых деформаций в тензорезисторах на мембранных ЧЭ может повысить их тензочувствительность по сравнению с тензорезисторами, ориентированными в кристаллографическом направлении максимальной продольной тензочувствительности <110> и существенно расширить область высокой чувствительности для размещения тензорезисторов на ЧЭ.

2. Разработаны рекомендации по оптимальному расположению кремниевых тензорезисторов на тензопреобразователях с КНС-структурами, обеспечивающими максимальный выходной сигнал. Разработана топология тензочувствительной схемы с технологической балансировкой начального сигнала.

3. Предложен, теоретически обоснован и экспериментально исследован мембранно-рычажный тензопреобразователь силы, обеспечивающий высокую чувствительность и точность преобразования.

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования упругих систем преобразователей для измерения малых и средних давлений. Получены аналитические зависимости, на основе которых возможно оптимизировать параметры упругих систем для обеспечения максимальной чувствительности. Полученные зависимости могут служить основой для инженерного расчета ИПД для промышленных систем управления.

5. Проведены исследования упругой системы ИПД с использованием эффекта гидравлического усиления. Получены аналитические зависимости для определения коэффициента передачи и температурной составляющей аддитивной погрешности. В результате исследований предложена упругая система ИПД, обеспечивающая

минимальную температурную погрешность и высокую чувствительность

6. Разработана технология активной пайки КНС-структуры с корпусом тензопреобразователя из сплавов ВТ-9, ВТ-15, ВТ-16, ВТ-20. Показано, что технология активной пайки КНС-структуры с титановым корпусом тензопреобразователя дает возможность создавать преобразователи давления и силы с повышенной циклической прочностью работой в широком диапазоне температур.

7. Исследовано влияние пайки в тензопреобразователях с однослойным и двухслойным ЧЭ на характеристики кремниевых тензорезисторов. Аналитически и экспериментально показано, что характеристики тензопреобразователей с двухслойным ЧЭ практически аналогичны характеристикам непаянной КНС-структуры. Исследован и разработан способ коррекции температурной составляющей аддитивной погрешности. Получены зависимости, позволяющие определить схему включения и элементы компенсатора.

8. В соответствии с проведенными исследованиями разработаны и внедрены в промышленности мембранные тензопреобразователи на основе КНС-структур, обладающие высокой точностью (нелинейность, как правило, в пределах 0,02-0,2%, вариация выходного сигнала менее 0,05%, воспроизводимость не хуже 0,03%), высокой стабильностью (смещение выходного сигнала не превысило 0,05% за 20 месяцев работы), высокой чувствительностью (до 60 мВ/В на $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$), высокой перегрузочной способностью ($\frac{\Delta R}{R} = 18\text{-}20\%$ без разрушения).

9. На базе мембранных тензопреобразователей с двухслойным ЧЭ на основе КНС-структур были разработаны и внедрены в промышленности ИПД "Кристалл", "Сапфир", "Сапфир-22" на пределы измерения от 0-0,00025 до 0-100 МПа с высокими метрологическими характеристиками, удовлетворяющие достаточно полно комплексу требований промышленных СУ ТП. Преобразователи успешно прошли Государственные приемочные испытания, занесены в Госреестр и освоены в серийном производстве на заводах Минприбора.

10. Подтверждена на примере ИПД "Кристалл", "Сапфир" и "Сапфир-22" правильность теоретических положений диссертационной работы и целесообразность использования тензопреобразователей с двухслойным ЧЭ на основе КНС-структур.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Евдокимов В.И. О коррекции аддитивной погрешности мостов с полупроводниковыми тензорезисторами.-Труды/НИИТеплоприбор, М., 1979, № 88, с.17-33.

2. Евдокимов В.И. Исследование влияния коэффициента сдвиговой тензочувствительности и сдвиговых деформаций на чувствительность датчиков с интегральными преобразователями.- В кн.: Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. Материалы конференции МДНТП.М., 1980, с.46-54.

3. Евдокимов В.И., Шадтина А.Г. Методика расчета преобразователей на основе кремний-сапфировых структур для измерения малых и средних давлений.- В кн.: Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники. Материалы конференции МДНТП.М., 1980, с.55-62.

4. А.с. 802821 (СССР) Устройство для измерения давления/ В.И.Евдокимов- Опубл. в Б.И., 1981, № 5.

5. Евдокимов В.И., Шадтина А.Г. К расчету полупроводниковых тензопреобразователей мембранно-рычажного типа.-Труды /НИИТеплоприбор, М., 1979, № 88, с.3-19.

6. Беликов Л.В., Берников В.И., Евдокимов В.И. и др. О проектировании датчиков давления с "интегральными"тензопреобразователями.- Реф.сб. М., ЦНИИТЭИПриборостроения, 1971, № 682,- 21 с.

7. Сердюков В.И., Кенигсберг В.Л., Евдокимов В.И. и др. Искробезопасные преобразователи "Сапфир" для измерения теплоэнергетических параметров в химической промышленности.-В кн.: Автоматизация периодических процессов в химической промышленности.Тез.докл. Всес.науч.-технической конференции.М.НИИТЭХИМ, 1979, с.195-202.

8. Никифорова З.В., Румянцев С.Г., Киселевский С.Л., Евдокимов В.И. Пайка сапфировых мембран с высокопрочными сплавами титана.- Сварочное производство, 1974,№3, с.35-36.

9. Кенигсберг В.Л.,Сердюков В.И.,Евдокимов В.И. и др. Полупроводниковый датчик давления"Кристалл".-Приборы и системы управления. 1974,№ 7,с.22-27.

10. А.с.645041(СССР). Измерительный преобразователь усилия /В.И.Евдокимов,А.Г.Лякишева,В.Л.Кенигсберг и др.- Опубл. в Б.И., 1979, № 4.

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА