

На правах рукописи

Басов Михаил Викторович

**СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ**

05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем
управления»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва 2022

Диссертация выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии
«Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Автоматики им. Н.Л. Духова»
(ФГУП «ВНИИА»).

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
заместитель начальника научно-исследовательского отдела – начальник
научно-исследовательской лаборатории во ФГУП «ВНИИА»
Ватопедский Александр Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
первый заместитель генерального директора по научной работе – главный
конструктор АО «СНИИП»
Чебышов Сергей Борисович

доктор технических наук,
заместитель главного конструктора филиала – начальник научно-
исследовательского отделения Филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
«НИИИС им. Ю.Е. Седакова»
Труфанов Алексей Николаевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Микро- и нанoeлектроника» НИЯУ МИФИ
Самотаев Николай Николаевич

Защита состоится «29» сентября 2022 г. в «_____» часов на заседании
диссертационного совета МИФИ.05.03 в Национальном исследовательском ядерном
университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ «МИФИ» и
на сайте ds.mephi.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.т.н.,

Веселов Денис Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования. Разработка микроэлектромеханических систем (МЭМС) является одним из прогрессивных направлений в микроэлектронике, которое определяют тенденции развития современных элементов и устройств вычислительной техники и систем управления. Датчик давления (ДД) — это устройство, способное преобразовать оказываемое на структуру воздействие давлением в электрический сигнал. Более 70 % всех измерений, выполняемых электронными системами управления и обработки информации, (в атомном и военном производстве, нефтегазовом, судо-, авто- и станкостроении, ракетной технике, авиации, транспорте, медицине, биофизике, термо- и аэродинамике, акустике, гидромеханике, геофизике, сельском хозяйстве и иных направлениях), связаны с измерениями давления, расхода, количества и уровня различных жидких и газообразных веществ. Основным элементом ДД является чувствительный элемент в виде кристалла ДД (в диссертационной работе значения словосочетаний «преобразователь давления» и «кристалл ДД» эквиваленты). Физические параметры кристалла ДД изменяются в зависимости от давления измеряемой среды. Точность, эксплуатационная и метрологическая надёжность автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом во многом определяется качеством датчиков, среди которых наиболее распространёнными являются ДД с электрическим (аналоговым или цифровым) выходным сигналом. К таким датчикам предъявляются жёсткие требования: высокая точность, миниатюрность, пороговая чувствительность, механическая прочность, возможность сопряжения с микроэлектронными преобразователями сигналов, долговременная стабильность, низкая погрешность по температурным характеристикам и нелинейности, а также иной массив выходных параметров. Требования к параметрам ДД фундаментально определяются возможностями достижения прецизионного выходного сигнала от кристалла ДД, получаемого известными в литературе методами и, в особенности, с использованием тензорезистивного эффекта на элементах электрической схемы в виде тензорезистивного моста (ТМ). В литературе фактически отсутствуют данные о создании кристалла ДД с иной электрической схемой, где в составе могут быть использованы как тензорезисторы (ТР), так и биполярные транзисторы (БТ), которые, в свою очередь, могут быть как деформируемыми биполярными тензотранзисторами (БТТ), так и недеформируемыми активными элементами электрической схемы. Использование активного элемента в электрической цепи кристалла ДД способно привести к существенному преобразованию кристалла, открывая новые возможности применения в различных областях промышленности и

науки. Таким образом, определенное соотношение между высокой чувствительностью, пониженными габаритами кристалла и определенным соотношением основных и дополнительных погрешностей ДД позволяет развивать и адаптировать элементы для производителей оригинального оборудования в сферах медицины (режим искусственной вентиляции легких постоянным положительным давлением и спирометрия), военной промышленности, систем промышленной вентиляции (системы с переменным расходом воздуха, отопления и кондиционирования), пользовательском (дроны и умные устройства), автомобильном применении (циркуляция выхлопных газов и срабатывание подушек безопасности) и иных областях промышленности (энергетической и авиакосмической). В настоящем актуальным направлением развития кристаллов ДД является реализация чувствительных элементов для низких диапазонов (ниже 10 кПа). Применимость предлагаемой разработки обширна, каждая из которых имеет определенные требования к чувствительным элементам в виде МЭМС. Практическая значимость во ФГУП «ВНИИА» им. Н.Л. Духова для сверхвысокочувствительных малогабаритных кристаллов ДД была определена в использовании элементов в составе тензомодулей ТЖИУ.408854.047 с преобразователем давления для внешнего предела измерений (ВПИ) до 10 кПа, предназначенных для гидроблоков ТЖИУ.406233.016 датчиков давления ТЖИУ406-М100. Все образцы преобразователей давления диссертационной работы были произведены на технологической линейке ФГУП «ВНИИА» и имеются в наличии для наглядной демонстрации реализации разработки.

Целью диссертационной работы является разработка технических принципов создания тензорезистивных преобразователя давления на основе схмотехнического решения для повышения чувствительности и минимизация габаритных размеров при сохранении входных условий по геометрии механической структуры мембраны, напряжению питания и низких показателей погрешностей.

Для достижения цели необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Обосновать, экспериментально подтвердить и распространить применение теории пьезопереходного эффекта для создания тензорезистивных преобразователей давления.
2. Разработать модель функционирования преобразователя давления с электрической схемой в виде дифференциального каскада с учетом обоснованного использования теории тензорезистивного и пьезопереходного эффектов. Разработать модель функционирования преобразователя давления по предлагаемым схмотехническим решениям построения электрических схем в виде дифференциального каскада с отрицательной обратной связью

и термокомпенсацией. Обосновать предложения по повышению чувствительности и понижению погрешностей по температурной и шумовой зависимости выходного сигнала.

3. Разработать серии топологий преобразователя давления и технологические маршруты реализации для ряда модификаций преобразователей давления с предлагаемыми схемотехническими решениями (п. 2).

4. Исследовать выходные характеристики разработанного преобразователя давления ТДК (по п. 2) и ТДК с ООС (по п. 2 и 3) в сравнительном анализе относительно аналогов с мостовой схемой для диапазонов давления до 60, 160 и 600 кПа.

5. Модернизировать конструкцию сверхвысокочувствительного малогабаритного преобразователя давления ТДК с ООС с наиболее эффективным конструкторским и схемотехническим решением для измерения диапазона до 10 кПа. Доказать актуальность применимости преобразователя давления ТДК с ООС в составе сборочных конструкций гидроблоков ТЖИУ.406233.016 датчиков давления ТЖИУ406-М100.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Схемотехническое решение мостового тензорезистивного преобразователя давления, отличающееся использованием в двух плечах мостовой схемы усилительных каскадов и применением восьми тензорезисторов в базовых, эмиттерных, коллекторных цепях усилителей, что обеспечивает увеличение чувствительности не менее чем в 3,5 раза относительно применения электрической схемы в виде тензорезистивного моста.

2. Конструкторско-технологическое решение построения тензорезистивного преобразователей давления по схеме п.1, отличающееся тем, что технологически реализуется топологическая структура, в соответствии с патентом РФ №195159 «Интегральный высокочувствительный элемент преобразователя давления на основе вертикального биполярного транзистора», в которой на полупроводниковой мембране в областях механических напряжений сжатия и растяжения размещаются восемь тензорезисторов р-типа проводимости и два недеформируемых биполярных транзистора с вертикальной структурой п-р-п-типа проводимости, что обеспечивает сокращение габаритных размеров не менее чем в 2,4 раза при сохранении показателей чувствительности относительно преобразователя давления со схемой в виде тензорезистивного моста.

Научная новизна диссертации:

1. Экспериментально подтверждена и распространена теория пьезопереходного эффекта для применения деформируемого биполярного транзистора в составе электрических схем кремниевых преобразователей механических напряжений.

2. Впервые предложена методика проектирования тензорезистивных преобразователей давления за счет применения оригинальных схемотехнических решений для электрической схемы в виде дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией, что позволяет увеличить чувствительность относительно применения резистивной мостовой схемы до 3,9 раз и относительно дифференциального каскада до 2,9 раз.

3. Впервые предложены конструкторские и технологические решения для создания преобразователя давления по п. 2, среди которых наиболее эффективным решением является применение недеформируемого биполярного транзистора с вертикальной структурой n-p-n-типа, что позволяет увеличить чувствительность относительно аналогов с применением резистивной мостовой схемы в 3,5 раза или сократить площадь преобразователя давления в 2,4 раза, а также увеличить чувствительность относительно аналогов с применением схемы дифференциального каскада в 2,8 раз, сократить погрешности по температурным характеристикам более чем на порядок и сократить шум выходного сигнала в 20 раз.

Практическая значимость диссертации:

1. Создана партия преобразователей давления ТДК с электрической схемой дифференциального каскада, чувствительность которых в 2,2 раза выше относительно аналога (ТМУ18) с применением мостовой схемы.

2. Создана партия преобразователей давления ТДК с ООС с электрической схемой дифференциального каскада с отрицательно обратной связью и термокомпенсацией с применением недеформируемых биполярных транзисторов с вертикальной структурой n-p-n-типа (V-NPN) или биполярных транзисторов с горизонтальной структурой p-n-p-типа (L-PNP), чувствительность которых в 3,5 раза или в 2,2 раза выше, соответственно, относительно аналога (ИПД60) с мостовой схемой. Анализ выходных характеристик партии преобразователей давления ТДК с ООС (V-NPN) доказал возможность сокращения габаритных размеров кристалла в 2,4 раза относительно аналога (ИПД52) с мостовой схемой при условии сохранения показателей чувствительности.

3. Создана партия сборочных конструкций ТЖИУ.4088554.047 с преобразователем давления ТДК с ООС (V-NPN) для гидроблоков ТЖИУ.406233.016 в составе датчиков давления ТЖИУ406-М100, применимых для атомной и нефтегазовой промышленности. Исследование партии ТЖИУ.4088554.047 подтвердило возможность одновременного увеличения чувствительности в 5,8 раз и сокращения площади кристалла в 2,4 раза относительно аналога с мостовой схемой, при условии сохранения напряжения питания, диапазона измеряемого давления до 10 кПа и низких показателей погрешностей.

4. Получены экспериментальные результаты, подтверждающие применение схемотехнического решения для повышения чувствительности и минимизации габаритных размеров тензорезистивных преобразователей давления при сохранении входных условий по геометрии механической структуры мембраны, напряжению питания и низких показателей погрешностей.

В результате проведенных исследований 5 образцов тензомодулей ТЖИУ.4088554.047 были переданы для применения в составе гидроблоков ТЖИУ.406233.016 датчиков давления ТЖИУ406-М100. По решениям для преобразователей давления ТДК с ООС получены патенты № RU 195159 U1 от 13.06.2019 и № RU 195160 U1 от 13.06.2019, использование которых документально подтверждено «Актом о внедрении результата интеллектуальной деятельности № T0522-05/028-2022 от 24.06.2022 и № T0522-05/029-2022 от 24.06.2022» во ФГУП «ВНИИА».

Личный вклад автора. Автору принадлежит определяющая роль в выборе объектов исследования, постановке цели и задач, выборе методик, получении, обработке и анализе результатов экспериментов. Исследование проводилось лично автором. Все экспериментальные результаты, их обработка и анализ, изложенные в диссертации, получены автором лично.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на IEEE Sensors (Sydney, Australia, 2021 г.), XII Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (п. Эльбрус, Россия, 2021 г.), XIV и XIII Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, Россия, 2019 г. и Екатеринбург, Россия, 2017 г.), XIII, XII, XI и VIII Научно-техническая конференция «ВНИИА» (Москва, Россия, 2019, 2018, 2017 и 2014 г.), V Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы микро- и нанoeлектроники» (Уфа, Россия, 2018 г.).

Опубликованные результаты. По теме диссертации опубликовано 6 статей в международных журналах, индексируемых системами Scopus и Web of Science (Sensors and Actuators A: Physical, IEEE Sensors Journal, IOP Journal of Micromechanics and Microengineering, IOP Physica Scripta), 2 статьи в российских научно-технических журналах, рекомендованных ВАК (Нано- и микросистемная техника, Датчики и системы), 5 патентов РФ, 1 статья в рецензируемых сборниках трудов международных конференций, индексируемых системами Scopus и Web of Science, 8 тезисов докладов в сборниках российских научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы из 230 наименований, 1 приложения и изложена на 178 страницах машинописного текста, а также включает 88 рисунков, 33 таблицы и 52 формулы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведено краткое описание состояния проблемы, сформулирована цель работы, научная новизна, описана структура диссертации, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

Глава I посвящена обзору существующих достоинств и недостатков, возникающих в процессе разработки кристаллов ДД, функционирующих на тензорезистивном эффекте с использованием полноценной электрической схемы ТМ, для достижения выходных параметров, включающих в себя требуемые показатели пороговой чувствительности для низких диапазонов ВПИ давления до 10 кПа (и ниже) [1-3] с минимально возможными показателями погрешностей измерения по нелинейности, температурному коэффициенту, а также механическому гистерезису и повторяемости. Выходные характеристики подобных разработок [4-7] напрямую зависят от габаритных размеров кристаллов ДД, и, как следствие, мембраны, а также геометрической структуры мембраны, где компенсаторы механических напряжений (МН) могут иметь любую форму, которая соответствует определенному расположению ТР схемы на утоненной части мембраны. Предел возможностей кристаллов ДД с подобными мембранными структурами может быть существенно усовершенствован за счет изменения топологического рисунка с иной электрической схемой с дифференциальным выходным сигналом. Дополнительно проанализированы аналоги кристаллов ДД и чувствительных элементов МН с использованием различных деформируемых структур активных элементов – это БТТ [8-10] и металл-оксид-полупроводник тензотранзистор (МОПТТ) [11,12]. В главе

обсуждаются принципы функционирования деформируемых активных элементов, как в одиночном исполнении, так и в составе различных электрических схем. Основным преимуществом разработок с использованием мостовой схемы с МОПТТ, схемы токового зеркала с БТТ и с единичным МОПТТ является возможность многократного сокращения площадей кристаллов и прецизионное расположение активных элементов в областях максимальных МН. Также обсуждаются принципы проектирования, технологические особенности и оптимизация выходных характеристик чувствительных элементов (чувствительность, температурная зависимость и иные). Наибольший интерес использования БТТ для кристаллов ДД представлен в ранних работах (1980-х годов) исследовательской группой из МИФИ под руководством Ваганова В.И. [8,9], где в качестве электрической схемы используется тензочувствительный дифференциальный каскад (ТДК) с БТТ и ТР. Авторы делают следующий вывод о преимуществах разработки: «таким образом, решается задача либо повышения чувствительности преобразователей при сохранении размеров, либо уменьшения размеров при сохранении чувствительности. Кроме того, можно: а) повысить мощность выходного сигнала за счет большей распределенности компонентов по поверхности упругого элемента; б) улучшить температурную стабильность преобразователя, в) улучшить пороговую чувствительность». Несмотря на данное, слабо обоснованное заявление, идея разработки находилась в первоначальной стадии, так как отсутствуют: 1) сравнительный анализ с кристаллом ДД с ТМ схемой и имеющего идентичную механическую структуру мембраны; 2) математическая модель тензоэффекта в БТТ и ТР, а также работы полноценной электрической схемы; 3) рассмотрение более прогрессивных технологические возможности реализации кристаллов ДД в настоящий момент; 4) рассмотрение более актуальных топологические построения для лицевой стороны кристалла ДД и структурное построение для обратной стороны кристалла ДД; 5) детальное исследование обширного списка входных и выходных характеристик кристалла ДД в статистическом анализе массива образцов; 6) предложения и обоснования по сокращению погрешностей кристаллов ДД, о которых в данных работах не упоминается. К сожалению, спустя более 40 лет данная идея не получила должного развития и далее не была представлена в какой-либо публикации академической международной литературы. Исследования диссертационной работы, основанные на использовании новой электрической схемы с применением активного элемента и последующей ее модернизации, в подробностях продемонстрируют и докажут достижение существенных преимуществ разработки (высокая чувствительность, малые габариты, низкая показатели погрешностей в зависимости от ВПИ и высокая

перегрузочная способность) и минимизации главных факторов погрешностей (температурные характеристики и шумовая составляющая выходного сигнала).

Группа исследователей НПК «Технологический центр» внесли неоценимый вклад в разработку тензорезистивных преобразователей давления в России [13-15]. В диссертационной работе автор использует наработки этих исследователей по применению геометрии механической части преобразователей в виде мембраны с одним или тремя жесткими центрами (ЖЦ). Используемая в этих разработках транзисторная схема термокомпенсации чувствительности сокращает погрешность по температурному коэффициенту чувствительности (ТКЧ) фактически на порядок, но при этом не оказывает влияния на рост чувствительности. В настоящей работе предложен технический принцип создания элементов с помощью реализации схемотехнического решения для повышения чувствительности с учетом ограничений на все остальные параметры преобразователей, в том числе, с прежними низкими значениями погрешностей. Для разработки сохраняется ряд входных условий по напряжению питания и геометрии мембраны (глава 3) или по напряжению питания и диапазону измеряемого давления (глава 4) относительно рассматриваемых аналогов. Показатели ТКЧ для преобразователей давления с различными видами электрических схем анализируются без учета использования транзисторной схемой термокомпенсации чувствительности. Предлагаемое автором решение позволяет объединить большее количество деформируемых ТР на единой структуре преобразователя давления с помощью БТ, а не просто увеличить сигнал за счет усиления от транзистора, как в случае с внешней схемой обработки сигнала. Данное решение также не является схожим с применением схемы из двух параллельно включенных тензорезистивных мостов, так как по сути в данном соединении схемы чувствительность имеет идентичные значения, что на структурах с одним резистивным мостом. Корректное сочетание параметров рабочих точек двух БТ и разных номиналов сопротивления восьми ТР в составе предлагаемой схемы ТДК с ООС позволяет более эффективно перераспределить потенциалы и токи при подаче давления. Для данного решения будет продемонстрировано достижение результата по получению низких показателей погрешностей, в том числе по временной стабильности в течение 9 часов (до 0,1%) и температурному гистерезису (до 0,3%), которые не могут быть скомпенсированы внешней схемой обработки сигнала. Разработка и реализация структур тензорезистивных преобразователей давления, которые будут представлены в последующих главах, полностью произведена самостоятельно автором и при частичном участии коллег при производстве на технологической линейке во ФГУП «ВНИИА». Безусловно, в настоящий момент трудоемкость создания нового вида разработки является существенно выше, чем

при производстве интегральных преобразователей давления со схемой резистивного моста. Образцы преобразователей имеются в наличии для наглядной демонстрации реализации разработки на момент написания диссертационной работы.

Глава II демонстрирует фундаментальный механизм влияния механической деформации на электрофизические параметры в кремниевых структурах. В пределах воздействий МН до 1 ГПа основным определяющим параметром тензоэффекта в структурах ТР и БТТ является подвижность носителей заряда. Изменение подвижности основных и неосновных носителей заряда зависит от номинала МН, а также выбора кристаллографической плоскости (КГП), кристаллографического направления (КГН) и типа проводимости. Тензорезистивный эффект на ТР, используемый во множестве кристаллов ДД для массового производства и исследовательских работ, основан на изменении подвижности основных носителей заряда и представлен в данной главе. Для БТТ существует иная малоизвестная теория пьезопереходного эффекта, где изменения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при воздействии МН происходит за счет изменения подвижности неосновных носителей заряда в базовой области. Термин «пьезопереходного эффекта» был впервые использован группой исследователей Fruett F. и Meijer G. из TU Delft в начале 2000 г. [11]. В главе детально продемонстрировано физическое обоснование пьезопереходного эффекта для двух видов структур БТТ: вертикальная структура n-p-n типа проводимости (V-NPN) и горизонтальная структура p-n-p типа проводимости (L-PNP). Как и в случае с тензорезистивным эффектом были введены понятия пьезопереходного коэффициента (для тока коллектора), который также зависит от выбора КГП, КГН и типа структуры БТТ. Практическая часть диссертационной работы начинается с экспериментального подтверждения теории пьезопереходного эффекта (рис. 1а), на примере БТТ V-NPN, с расчетом собственных значений пьезопереходного коэффициента, который существенно зависит от технологических и топологических особенностей строения БТТ (эксперимент доказывает достижение $\xi^{V-NPN}_{ijkm} = 0,89 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, значения группы исследователей из TU Delft $\xi^{V-NPN}_{ijkm} = 0,80 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$). После подтверждения теории пьезопереходного эффекта продемонстрирована корректность построения математической модели для тензорезистивного эффекта и анализа МН в мембранной структуре кристалла ДД (с помощью программного обеспечения (ПО) ANSYS) в сравнительном анализе с экспериментальными данными. Теории пьезопереходного и тензорезистивных эффектов были использованы для построения математической модели для кристалла ДД с новой электрической схемой ТДК (рис. 1б), имеющего собственные входные параметрические значения для БТТ V-NPN и ТР, и с более эффективной структурой мембраны (с ЖЦ, рис. 1в) относительно прототипа

[8,9] из главы I. Дополнительно обозначены два основных потенциальных недостатка по температурным характеристикам и шумовой составляющей выходного сигнала, которые теоретически могут быть отражены при последующем экспериментальном исследовании преобразователей с биполярными транзисторами. При условии сохранения входных параметров, таких как диапазон измеряемого давления, напряжение питания, структура механической части преобразователей и их габаритные размеры, а также диапазон измерений, доказана возможность увеличения основополагающего выходного параметра чувствительности в 2,2 раза относительно кристалла ДД с электрической схемой ТМ. Дополнительно продемонстрировано, что влияние изменения температуры может критично повлиять на значения по выходному сигналу с показателем температурного коэффициента нулевого сигнала $TKH = 3,4 \text{ } \%/10^{\circ}\text{C}$.

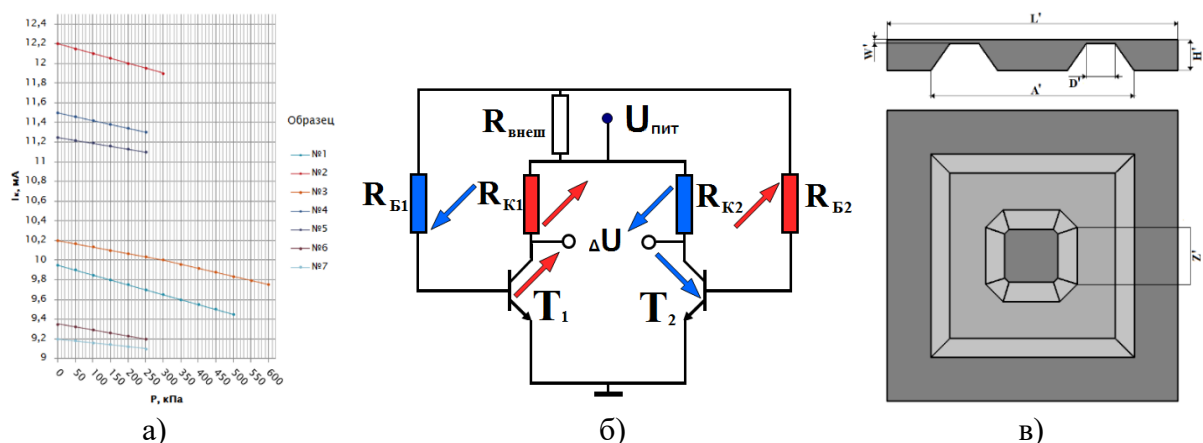


Рисунок 1 – Кристалл ТДК: а) изменения тока коллектора БТТ V-NPN от подаваемого давления $\Delta I_k(\Delta P)$, б) электрическая схема, г) геометрия обратной стороны (мембраны)

В диссертационной работе предложено кардинально новое схемотехническое решение для реализации кристалла ДД с активным элементом. Электрическая схема ТДК усовершенствована за счет использования отрицательной обратной связи и термокомпенсации для двух ветвей (рис. 2а). Такое схемотехническое решение позволяет более эффективно перераспределить токи и потенциалы в электрической схеме для повышения чувствительности (при сохранении геометрии мембраны, напряжения питания $U_{пит} = 5V$ и за счет увеличения количества ТР с 4 до 8) и термокомпенсации выходного сигнала всей схемы (за счет стабилизации температурной зависимости падения напряжения база-эмиттер на БТТ при наличии двух дополнительных резисторов для базового делителя). Любой схемотехнический метод также должен логично оценивать возможности практической реализации подобных электрических соединений и полупроводниковых структур в ее составе на имеющихся на данный момент технологических возможностях производственной линейки кристаллов ДД.

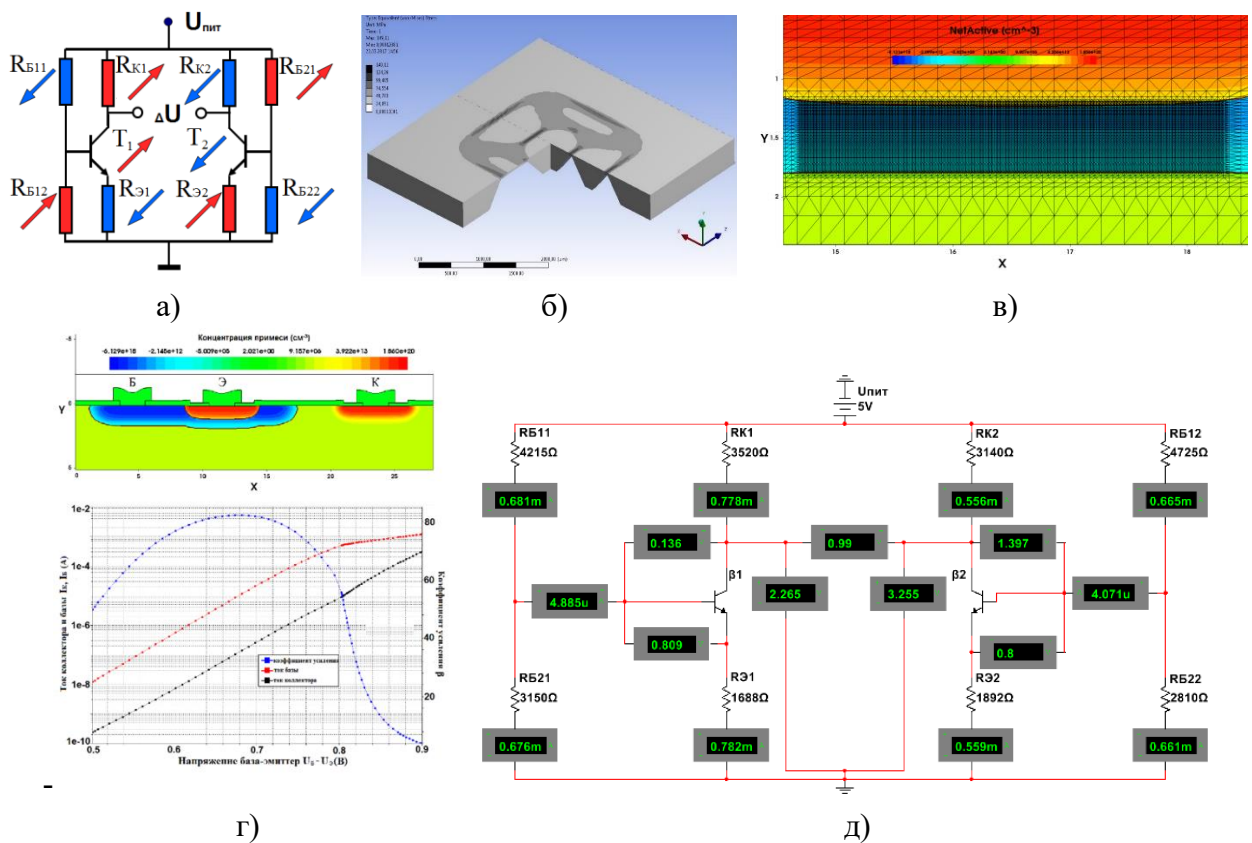


Рисунок 2 – Кристалл ТДК с ООС (пример с БТ V-NPN для ВПИ до 60 кПа; для БТ L-PNP и иных ВПИ давления были также полностью созданы подобные модели):

а) электрическая схема с деформируемым БТ V-NPN, б) распределение МН в мембранной структуре (по Мизесу) в ПО ANSYS, в) толщина активной базовой области в ПО Synopsys TCAD, г) структура БТ и ВАХ $I_K(U_B - U_Э)$, $I_B(U_B - U_Э)$ и $\beta(U_B - U_Э)$ в ПО Synopsys TCAD, д) распределение номиналов сопротивлений, токов и падений напряжений при воздействии давления $\Delta P = 100$ кПа (подача давления с обратной стороны кристалла ДД)

Для данного метода построена более детальная математическая модель функционирования 4 типов электрических схем ТДК с ООС с использованием деформируемых и недеформируемых двух видов БТ с вертикальной структурой n-p-n-типа проводимости (V-NPN) и горизонтальной структурой p-n-p-типа проводимости (L-PNP), основанная на: 1) аналитическом расчете номиналов сопротивлений TR (в отличие от мостовой схемы 4 вида TR $R_{B11(21)}$, $R_{B12(22)}$, $R_{Э1(Э2)}$ и $R_{K1(K2)}$ попарно имеют собственные значения) и рабочих точек БТ, где для БТ V-NPN или БТ L-PNP имеется определённый набор номиналов TR , для балансного соотношения между высокой чувствительностью, низкой температурной погрешностью и низкими показателями шумовой составляющей выходного сигнала; 2) детальном построении процессов диффузии для технологического маршрута и анализе ВАХ БТ в ПО Synopsys TCAD, с учетом формирования двух видов БТ и TR на единой кремниевой пластине (рис. 26). Снижение шума выходного сигнала

кристалла ТДК с ООС происходит благодаря сокращению толщины активной базовой области БТТ, где наблюдается рекомбинация неосновных носителей, вызывающая Флиллер-шум (рис. 2в); 3) анализе областей максимальных МН в мембранной структуре с тремя ЖЦ для трёх видов ВПИ давления с помощью ПО ANSYS (рис. 2г); 4) определении выходных характеристик по чувствительности и дополнительной температурной погрешности при моделировании схемы ТДК с ООС в ПО NI Multisim (рис 2д).

Для теоретического подтверждения преимуществ предлагаемых схемотехнических решений для преобразователей давления ТДК с ООС был проведен ряд исследований, которые в сравнительном анализе доказали актуальность использования кардинально новой электрической схемы дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией:

а. Преобразователь давления ТДК с ООС с электрической схемой дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией с применением биполярного транзистора с вертикальной структурой п-р-п-типа проводимости и с биполярным транзистором с горизонтальной структурой р-п-р-типа проводимости имеют существенные преимущества относительно прототипа ТДК с электрической схемой дифференциальной каскада – это увеличение чувствительности в 2,9 раз и в 2,3 раза, а также сокращение дополнительной составляющей по ТКН в 15 раз и в 6 раз соответственно, при условии сохранения номинала питания для электрической схемы, общих габаритных размеров преобразователей и величины подаваемого давления;

б. Преобразователь давления ТДК с ООС с электрической схемой дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией с применением биполярного транзистора с вертикальной структурой п-р-п-типа проводимости и с биполярным транзистором с горизонтальной структурой р-п-р-типа проводимости имеет существенные преимущества относительно преобразователя давления с электрической схемы резистивного моста для трёх видов диапазонов дифференциального давления до 60, 160 и 600 кПа по чувствительности в среднем по всем диапазонам в 3,9 раза и в 3,3 раза соответственно.

Преобразователь давления ТДК с ООС с электрической схемой дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией с применением биполярного транзистора с вертикальной структурой п-р-п-типа проводимости имеет существенные преимущества относительно преобразователя с электрической схемой в виде токового зеркала из четырех биполярных транзисторов р-п-р-типа проводимости в увеличении выходной чувствительности в 2,4 раза и относительно преобразователя с деформируемым металл-оксид-полупроводниковым транзистором в составе

электрической схемой в виде мостовой схемы в увеличении выходной чувствительности в 11 раз при условии воздействия одинакового номинала механических напряжений.

В главе III, после обсуждения вариации из 4 топологических структур для кристалла ТДК и описания технологического маршрута, была выбрана рабочая структура (рис. 3а) и проведен сравнительный анализ выходных характеристик относительно аналога с электрической схемой ТМ (ТМУ18) и идентичной геометрией механической части. Показатели 11 образцов кристалла ТДК для диапазона давления с ВПИ до 60 кПа продемонстрировали достижение чувствительности $S_{\text{ТДК}} = 0,66 \pm 0,05$ мВ/кПа/В, что в среднем 2,2 раза превышает средний показатель кристалла ТМ (рис. 3б).

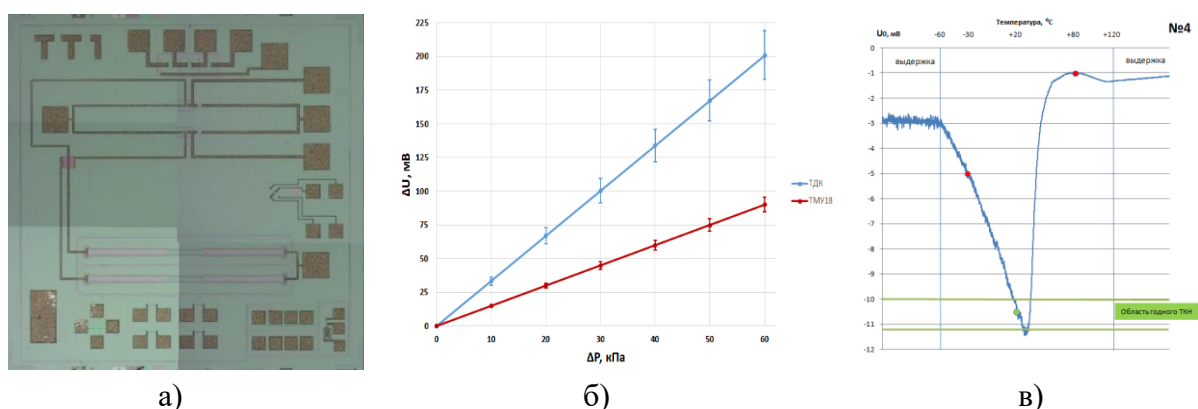


Рисунок 3 – Кристалл ТДК: а) фото лицевой стороны, б) изменение выходного сигнала от давления (в сравнении с кристаллом ТМ (ТМУ18)), в) пример изменения выходного сигнала от температуры

В результате исследований были обозначены два основных недостатка разработки – это высокая погрешность по температурным характеристикам ($ТКН = 2,5 \pm 1,3$ %/10°C, $ТКЧ = 2,9 \pm 0,3$ %/10°C, $ТГН = 6,2 \pm 3,6$ % и $ТГЧ = 2,0 \pm 0,9$ %, что существенно выше показателей кристалла ТМ, рис. 3в) и шумовой составляющей выходного сигнала ($U_{\text{шум}} = \pm 300$ мкВ, что на 2 порядка выше показателей кристалла ТМ). Также необходимо отметить повышение разбаланса начального выходного сигнала кристалла ДД из-за наличия большего количества элементов в схеме и, в частности, из-за БТТ ($|U_0| < 100$ мВ).

На основании математической модели и усовершенствованного технологического маршрута были разработаны 9 видов топологии кристалла ТДК с ООС (рис. 4). Топологии кристалла ТДК с ООС отличаются: 1) выбором структуры БТ V-NPN или L-PNP и, соответственно, номиналами ТР; 2) тангенциальным и радиальным расположением базовой области БТТ; 3) использованием сокращенного номинала сопротивления к эмиттерной области R_3 для БТ L-PNP из-за наличия паразитной составляющей тока в

подложку от транзистора «эмиттер-эпитакс-подложка»; 4) расположением БТ на деформируемой и недеформируемой области мембраны.

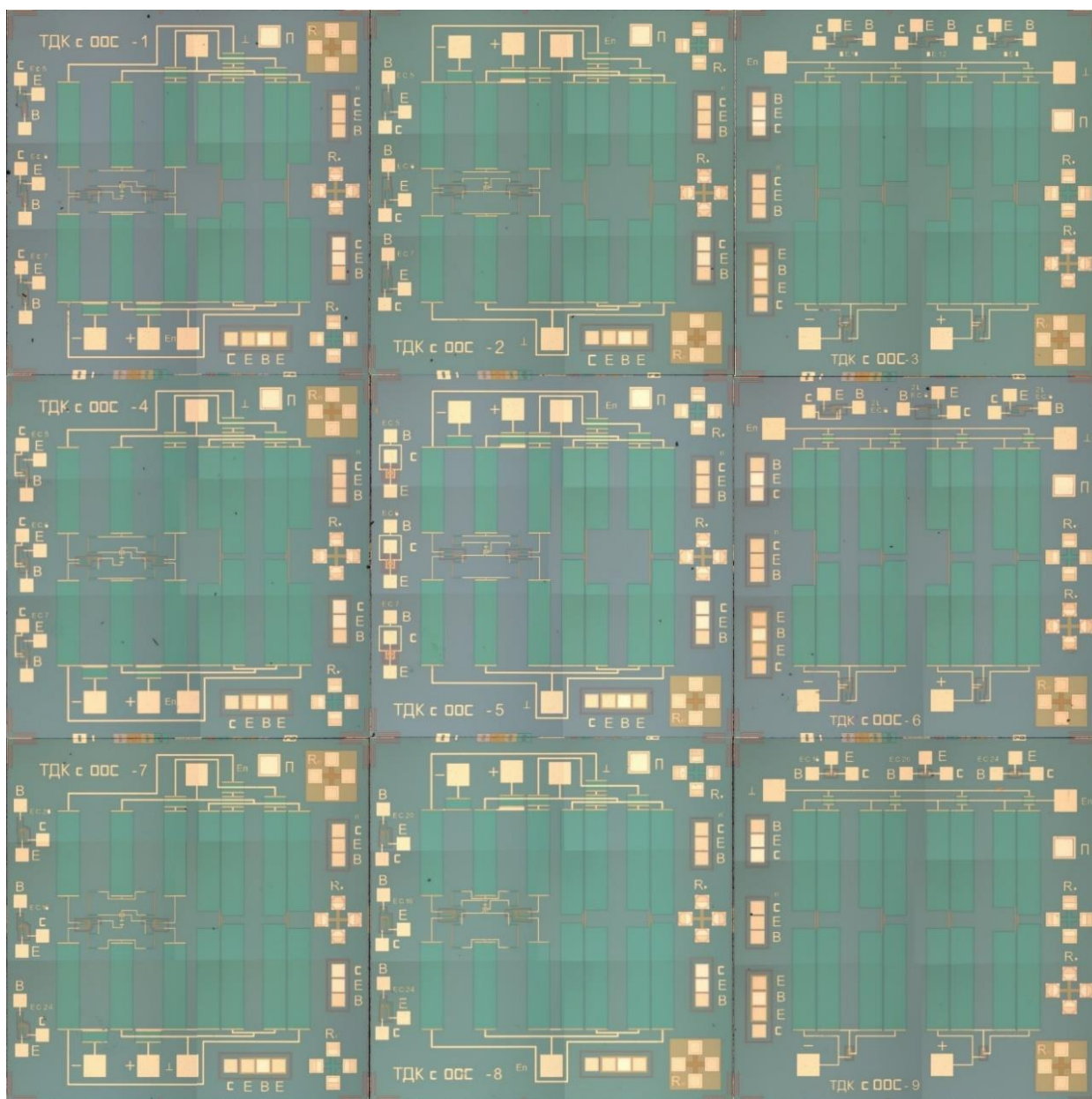


Рисунок 4 – 9 видов реализованных топологий кристаллов ТДК с ООС

Для всех 9 видов топологий было использовано 3 структуры механической части кристалла ТДК с ООС для диапазонов давлений до 60, 160 и 600 кПа. При проектировании топологий №1, 2, 4, 5, 7 и 8 используется деформируемый БТ, который необходимо было компактно расположить в области максимальных МН ($A_{MN} \approx 40 \times 400$ мкм) совместно с ТР и с учетом размещения БТ в ограниченной области в пределах охранного кольца (использованы кремниевые пластины с эпитаксиальной структурой), где выводы контактов БТ из высоколегированных проводниковых областей формируются без использования металлизации на поверхности утоненной части мембраны (рис. 5). При

проектировании зазора ($d = 10$ мкм) между высоколегированными проводниковыми областями к БТ была допущена ошибка. При расчете расстояния между проводниковыми областями необходимо учитывать множество факторов, связанных с: 1) шириной клина травления окисла кремния при фотолитографии, 2) боковой диффузией примеси, 3) областью распределения заряда (ОПЗ) при данных потенциалах схемы. При пересечении ОПЗ соседних высоколегированных проводниковых областей для БТТ нарушается работа всей электрической схемы ТДК с ООС, что привело к несостоятельности топологии №1, 2, 4, 5, 7 и 8. Расчет показал, что в данном случае минимальный зазор между данными областями должен быть более $d > 12$ мкм.

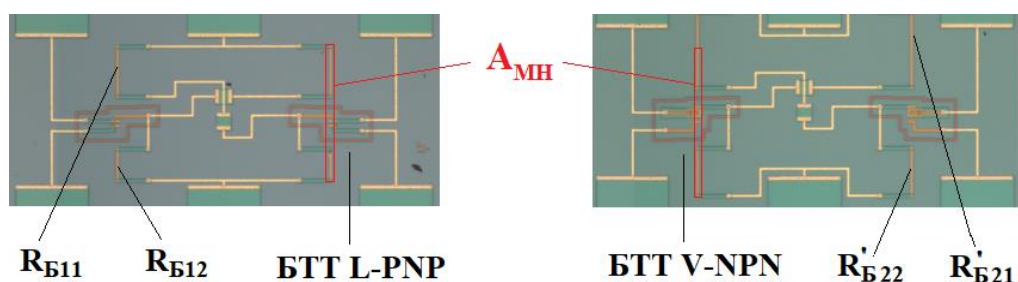


Рисунок 5 – Расположение БТТ и ТР на утоненной части мембраны

Топологии №3 с недеформируемым БТ L-PNP и $R_3 = 4,5$ кОм, №6 с недеформируемым БТ L-PNP и $R_3 = 1,5$ кОм и №9 с недеформируемым БТ V-NPN успешно удались. Анализ выходного сигнала от давления в ПО NI Multisim продемонстрировал, что разница между использованием деформированного БТТ и недеформированного БТ в данных электрических схемах составляет от 1 до 5% для БТТ, но, как показала практика, сама разработка топологии, учитывающая все особенности расположения ряда элементов в ограниченной области максимальных МН, приводит к значительному усложнению компоновки элементов схемы. Далее все выходные характеристики кристалла ТДК с ООС будут представлены в сравнительном анализе с кристаллом ТМ (ИПД60) с единой площадью и геометрическими параметрами структуры мембраны (серийно выпускаемый кристалл ДД во ФГУП «ВНИИА»). Кристаллы ТДК с ООС были собраны в кремниевую конструкцию для снятия остаточных МН и герметичной подачи давления с одной из сторон кристаллов и затем в корпус тензомодуля ДД для последующего измерения. В табл. 1 и на рис. 6а представлены зависимости выходной чувствительности от толщины мембраны (основной влияющий параметр на чувствительность для достижения определенных диапазонов ВПИ) для трех видов кристалла ТДК с ООС и кристалла ТМ. Длина ребра ЖЦ для кристаллов ТДК с ООС в среднем составила $Z = 490 \pm 50$ мкм, зазор между ЖЦ или ЖЦ и рамкой кристалла $D =$

58 ± 3 мкм. Из представленных результатов видно, что кристалл ТДК с ООС с топологиями №3, 6 и 9 имеют в среднем в 1,7, 2,2 и 3,5 раза, соответственно, выше чувствительность от давления, чем кристалл ТМ.

Таблица 1 – Показания чувствительности для трех видов топологии кристалла ТДК с ООС относительно кристалла ТМ

Вид кристаллов для ВПИ	Толщина мембраны $W_{\text{мемб}}$, мкм	Чувствительность S , мВ/кПа/В			
		ТДК с ООС №3	ТДК с ООС №6	ТДК с ООС №9	ТМ
60 кПа	$31,0 \pm 1,5$	$0,991 \pm 0,098$	$1,216 \pm 0,149$	$1,877 \pm 0,116$	$0,515 \pm 0,049$
160 кПа	$40,0 \pm 1,5$	$0,556 \pm 0,041$	$0,729 \pm 0,045$	$1,031 \pm 0,097$	$0,310 \pm 0,033$
600 кПа	$63,0 \pm 1,5$	$0,172 \pm 0,017$	$0,208 \pm 0,025$	$0,398 \pm 0,044$	$0,115 \pm 0,009$

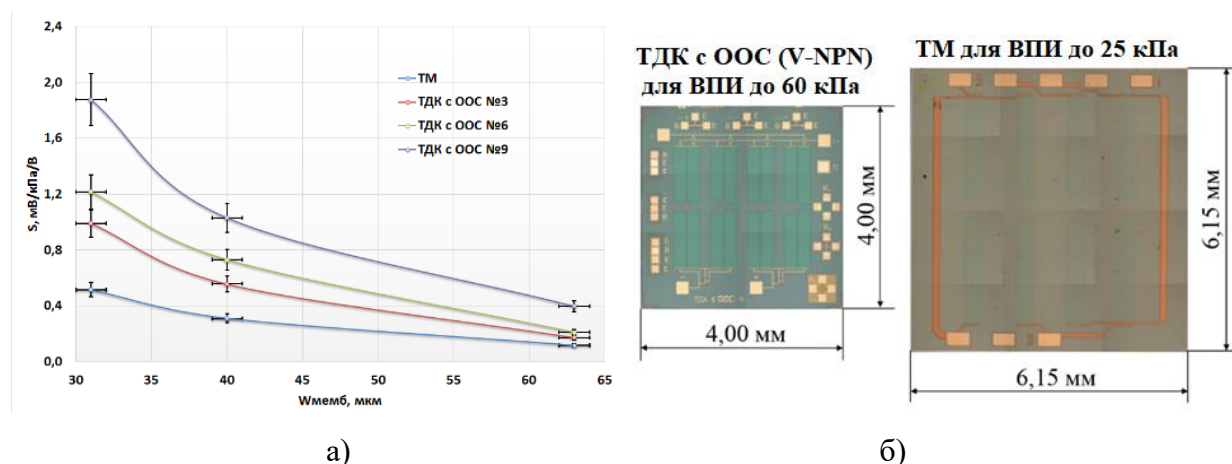


Рисунок 6 – Кристалл ТДК с ООС: а) зависимости выходной чувствительности от толщины мембраны (диапазона, ВПИ) для трех видов кристалла ТДК с ООС относительно кристалла ТМ, б) пример сокращения площади кристалла ДД в 2,4 раза при сохранении чувствительности и номинала толщины утоненной части мембраны

На рис. 6б наглядно продемонстрирована возможность сокращения площади кристалла ДД в 2,4 раза и увеличения момента давления-разрушения в 5,2 раза ($P_{\text{разруш ТДК с ООС}} = 1,6$ МПа) относительно кристалла ДД (ИПД52) с электрической схемой ТМ при сохранении чувствительности $S = 1,9$ мВ/кПа/В и толщины утоненной части мембраны ($W = 35$ мкм). Из-за потребностей балансировки 8 ТР и 2 БТ ограничения по разбалансу выходного сигнала были приняты равными $|U_0 \text{ ТДК с ООС}| < 60$ мВ. Высокие показатели шумовой составляющей выходного сигнала (в диапазоне частот порядка десятков килогерц) были сокращены до значений $\Delta U_{\text{шум ТДК с ООС №3, 6}} = \pm 60$ мкВ для топологий №3 и 6, что в 5 раз ниже значений прототипа кристалла ТДК $\Delta U_{\text{шум ТДК}} = \pm 300$ мкВ, и до $\Delta U_{\text{шум ТДК с ООС №9}} = \pm 15$ мкВ, что в 20 сокращает прежние показатели на кристалле ТДК и всего в 6 раз превышает значения на кристалле ТМ. Для наиболее

актуального для рассмотрения диапазона ВПИ до 60 кПа из-за более резких зависимостей погрешностей и имеющего большее количество образцов для статистики (топология №3 – 22 образца, №6 – 28 образцов и №9 – 20 образцов) был исследован массив параметров по погрешностям кристаллов ДД в составе сборочных конструкций тензомодулей ДД. Помимо преимуществ по чувствительности, кристалл ТДК с ООС с топологией №9 с БТ V-NPN имеет гораздо более лучшее соотношение между элементами электрической схемы для достижения низких погрешностей по температурным характеристикам как относительно кристалла ТДК с ООС топологий №3 и №6 с БТ L-PNP, так и относительно ранее представленной разработки кристалла ТДК по всем 8 исследуемым параметрам. Температурные характеристики кристалла ТДК с ООС все еще остаются выше, чем аналогичные значения на кристалле ТМ (ИПД60), но при этом показатели были сокращены более чем на порядок относительно прототипа кристалла ТДК. Оценивая превышение погрешностей по температурным характеристикам только в отрицательном диапазоне температур (от $+20^{\circ}\text{C}$ до -30°C), мы наблюдаем приемлемо небольшой рост показателей ТГН в 2,2 раза, ТГЧ в 1,8 раза и ТКН в 2,7 раза, а также снижение ТКЧ в 1,3 раза. Причиной более высоких превышений температурных характеристик на положительном диапазоне является нарастающее стремление для перехода БТ V-NPN к режиму насыщения при $T > +60^{\circ}\text{C}$. Таким образом, наиболее привлекательным диапазоном измерения температурных характеристик кристалла ТДК с ООС топологии №9 является область с пониженной верхней границей от $T = +80^{\circ}\text{C}$ до $T = +60^{\circ}\text{C}$, в которой ТГН уменьшается в 2,0 раза, ТГЧ в 1,3 раза, ТКН в 2,0 раза и ТКЧ в 1,9 раза. Таким образом, в положительном диапазоне температур (до $T = +60^{\circ}\text{C}$) мы наблюдаем малый рост ТГН в 1,3 раза, ТГЧ в 1,2 раза, ТКН в 2,9 раза и ТКЧ в 1,5 раза относительно аналога ТМ. Можно сделать вывод, что кристалл ТДК с ООС с наиболее эффективно построенной электрической схемой топологии №9 в диапазоне температур $-30...+60^{\circ}\text{C}$ имеет погрешности не более чем на порядок выше показаний кристалла ТМ, как это ранее было продемонстрировано на прототипе кристалла ТДК, а всего в 1,5-2,5 раза и не превышает границы в 0,3% для гистерезиса и $0,3\%/10^{\circ}\text{C}$ для коэффициента изменения сигнала. Дополнительно были рассмотрены погрешности кристалла ТДК с ООС по нелинейности, механической прочности, воздействию всестороннего обжатия и временной стабильности, также для наиболее оптимальной конструкции топология №9 с недеформируемым БТ V-NPN. Нелинейность кристалла ТДК с ООС имеет параметр в 1,7 раза ниже, чем показатели кристалла ТМ, что говорит о существенном преимуществе данной разработки. Погрешность по изменению нулевого выходного сигнала кристалла ТДК с ООС при воздействии перегрузочного давления с двух сторон кристалл, а также

при воздействии всестороннего обжата остается равным параметру для кристалла ТМ в пределах разброса значений между образцами. Из-за наличия активного элемента в схеме временная стабильность кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 60 кПа по нулевому выходному сигналу выросла в 3,0 раза, а по чувствительности в 1,8 раза относительно кристалла ТМ, но при этом не превышает лимита погрешности в 0,1%.

В главе IV рассмотрена актуальная возможность применения новой электрической схемы ТДК с ООС для создания сверхвысокочувствительного малогабаритного кристалла ДД для низких диапазонов давления. Предложенный вид разработки сверхвысокочувствительного малогабаритного кристалла ТДК с ООС был использован в составе сборочной конструкции гидроблоков ТЖИУ.406233.016 (дифференциальное давление с ВПИ до 10 кПа) датчиков давления ТЖИУ406-М100. Параметрические показания сверхвысокочувствительного малогабаритного кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа в составе тензомодуля ТЖИУ.408854.047 будут соотнесены с характеристиками кристалла ТМ (ИПД52) для серийно выпускаемого тензомодуля ТЖИУ.408854.026-01 (также для диапазона до 10 кПа) во ФГУП «ВНИИА» (и потенциально применяемого как аналог сверхвысокочувствительному малогабаритному кристаллу ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа для датчиков давления ТЖИУ406-М100). В главе обоснованы причины фактического предела в проектировании кристаллов ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа, где необходимо одновременно выполнить требования по достижению пороговой чувствительности и массиву различных видов погрешностей. Основной задачей при моделировании было определить: как изменить геометрию механической части кристалла ТДК с ООС, чтобы добиться существенно более высоких показаний выходной чувствительности (более чем в 5 раз) для ВПИ до 10 кПа при условии заранее заявленной сокращенной площади в 2,4 раза относительно кристалла ИПД52. По результатам, полученным в главе III, для наиболее актуальной топологической структуры кристалла ТДК с ООС с недеформируемым БТ V-NPN (рис. 7а) была модернизирована конструкция механической части (мембраны) для анализируемого преобразования низкого диапазона давления до 10 кПа в электрический сигнал. Математическая модель была скорректирована под использование иных номиналов МН от давления с измененной конструкцией мембраны кристалла ТДК с ООС. Дополнительно оптимизирован топологический рисунок лицевой стороны кристалла ТДК с ООС с сохранением геометрического расположения ТР и БТ на кристалле ДД. Эпитаксиальные структуры кремниевых пластин и технологический маршрут, определенный ранее в результате моделирования в ПО Synopsys TCAD по картам распределения легируемой примеси для каждой из областей в отдельности и для целых структур БТ, а также их ВАХ, и

подтвержденный экспериментально, полностью совпадает с аналогом для более высоких ВПИ, за исключением дополнения в виде формирования тонкого надмембранного окисла (НО) $W_{SiO_2} = 55$ нм по причине потенциального воздействия остаточных МН на основные параметры кристалла ТДК с ООС.

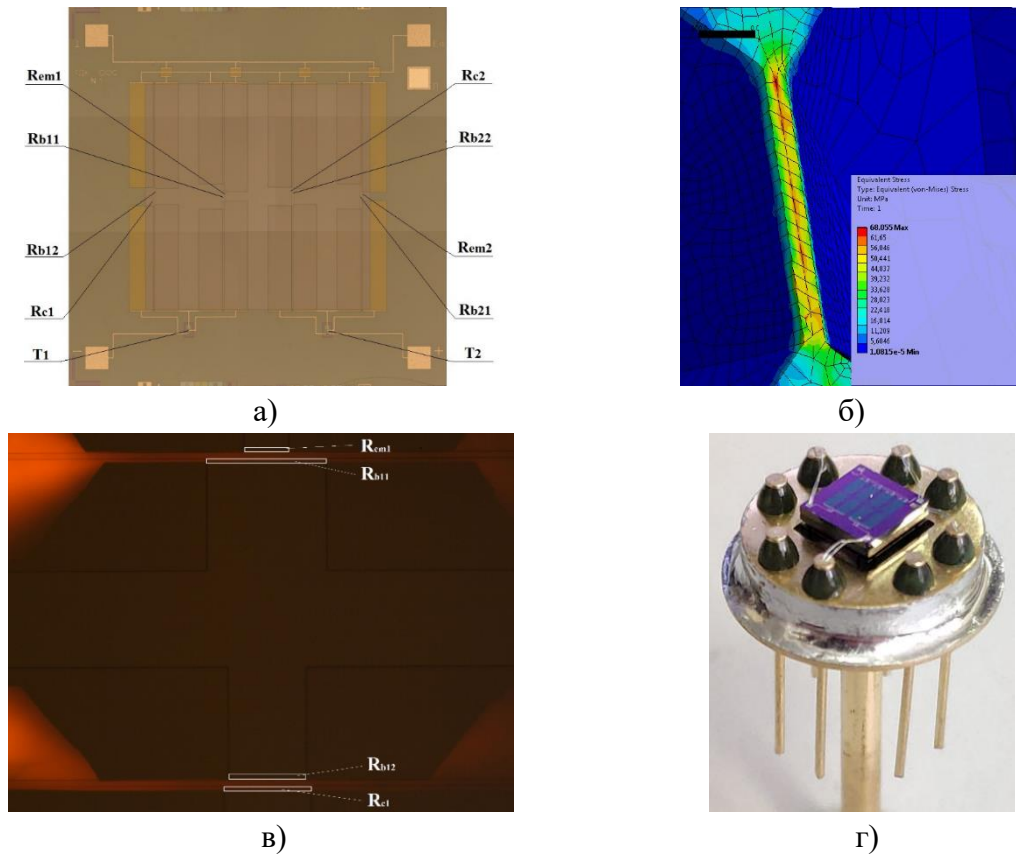


Рисунок 7 – Кристалл ТДК с ООС для диапазона до 1 кПа: а) лицевая сторона, б) карта распределение МН между ЖЦ, в) просвеченный сектор с расположением ТР относительно ЖЦ (R_C – наибольший по длине ТР в схеме), г) в составе тензомодуля ДД

При моделировании были проанализированы возможности изменения геометрии механической части кристалла со схожей структурой, как для ВПИ до 60, 160 и 600 кПа (3 ЖЦ, жидкостное анизотропное травление с малой частью изотропного дотравливания на финальной стадии), за счет вариации трёх основных параметров: длины ребра ЖЦ Z , зазора между ЖЦ или ЖЦ и рамкой кристалла ДД D , а также толщины ее утоненной части W (рис. 7б). МН $\sigma_j = 51,2$ МПа (по фон Мизесу) при подаче давления $\Delta P = 10$ кПа со стороны мембраны достигнуты при проектировании толщины утоненной части $W = 10$ мкм, длины стороны утоненной части квадратной мембраны $A = 2260$ мкм и с площадями распределения максимальных МН между концентраторами напряжений ($Z \times D = 800 \times 26$ мкм). Используя теорию тензорезистивного эффекта для определенного уровня легирования ТР был произведен расчёт относительного изменения сопротивления,

который составляет $dR_i = 3,2 \%$, а также рассчитаны теоретические показатели чувствительности для электрической схемы ТДК с ООС в ПО NI Multisim $S_{\text{ТДК с ООС } 10 \text{ кПа теор}} = 11,1 \text{ мВ/В/кПа}$ и дополнительной температурной погрешности по $ТКН_{\text{теор ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} = 0,04 \%/10^0\text{С}$. На рис. 7в представлена фотография сектора реализованной геометрии мембраны сверхвысокочувствительного малогабаритного кристалла ТДК с ООС, на котором при просвечивании утоненной части между ЖЦ видно расположение ТР. Как и в случае прототипов для больших ВПИ, сверхвысокочувствительные малогабаритные кристаллы ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа были собраны в кремниевую конструкцию и затем в корпус тензомодуля ДД идентичным методом (рис. 7г). Было получено 18 рабочих образцов тензомодулей. Как упоминалось ранее, первоначально для доказательства эффективности разработки в целом, а также достижения требуемых параметров для гидроблоков ТЖИУ.406233.016, выходные характеристики будут рассмотрены относительно тензомодуля ДД с кристаллом ИПД52 с электрической схемой ТМ (14 образцов). Все параметры проанализированы при условии подачи избыточного давления с каждой из сторон кристалла ДД. Изначально отметим входное преимущество по сокращению площади кристалла ТДК с ООС в 2,4 раза, равной $4,00 \times 4,00 \text{ мм}$, относительно площади ИПД52, равной $6,15 \times 6,15 \text{ мм}$. Из статистических данных по образцам ограничения на нулевой выходной сигнал для кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа были заявлены до $|U_0 \text{ ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}| < 30 \text{ мВ}$. Чувствительность кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа составила $S_{\text{ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} = 10,19 \pm 2,31 \text{ мВ/В/кПа}$ в среднем относительно двух видов подачи давления (со стороны мембраны и с лицевой стороны кристалла ДД) или $\Delta U_{\text{ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} = 509,7 \pm 115,6 \text{ мВ}$ при $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$ и подаче давления $\Delta P = 10 \text{ кПа}$, что в 5,8 раз выше, чем на аналоге кристалле ИПД52, где $S_{\text{ИПД52 для } 10 \text{ кПа}} = 1,76 \pm 0,30 \text{ мВ/В/кПа}$ или $\Delta U_{\text{ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} = 87,9 \pm 14,9 \text{ мВ}$ при $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$ и подаче давления $\Delta P = 10 \text{ кПа}$. Нелинейность кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа составила $2K_{\text{NL ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} = 0,26 \pm 0,12 \%$ в среднем относительно двух видов подачи давления (со стороны мембраны и с лицевой стороны кристалла ДД), что в 6,5 раз выше, чем на аналоге-кристалле ИПД52, где $2K_{\text{NL ИПД52 для } 10 \text{ кПа}} = 0,04 \pm 0,02 \%$, но удовлетворяет условиям, заявленным для разработки ($2K_{\text{NL}} < 0,50 \%$). График зависимости чувствительности и нелинейности от подаваемого давления представлен на рис. 8. Шумовая составляющая выходного сигнала кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа $\Delta U_{\text{шум ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} = \pm 15 \text{ мкВ}$ (рис. 9а), что идентично показателям партии кристаллов ТДК с ООС для ВПИ до 60 кПа, представленных в главе III. Для двух видов партий тензомодулей наблюдается фактически схожее соотношение полезного сигнала от подаваемого давления к шумовой составляющей выходного сигнала: $\Delta U_{\text{ТДК с ООС для } 10 \text{ кПа}} /$

$\Delta U_{\text{шум ТДК с ООС для 10 кПа}} = 509,7 \cdot 10^3 / 15 \approx 3,4 \cdot 10^4$ для кристалла ТДК с ООС и $\Delta U_{\text{ИПД52 для 10 кПа}} = 87,9 \cdot 10^3 / 2,5 \approx 3,5 \cdot 10^4$ для кристалла ИПД52.

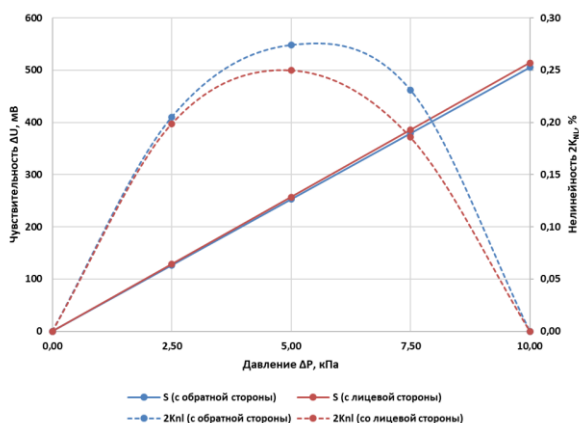


Рисунок 8 – График зависимости чувствительности и нелинейности от подаваемого давления кристалла ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа

Технические условия на тензомодуль ТЖИУ.408854.047 рассматривают показатели ТКН и ТКЧ в поддиапазонах температур от +5 до +25 °С и от +25 до +45 °С и показатели ТГН и ТГЧ в поддиапазонах температур от -55 до +25 °С и от +25 до +55 °С. На рис. 9б представлен пример зависимости выходного сигнала от температуры для последующей корреляции ТКН внешней схемой обработки сигнала в диапазоне более широком, чем рабочий от -30 до +60 °С.

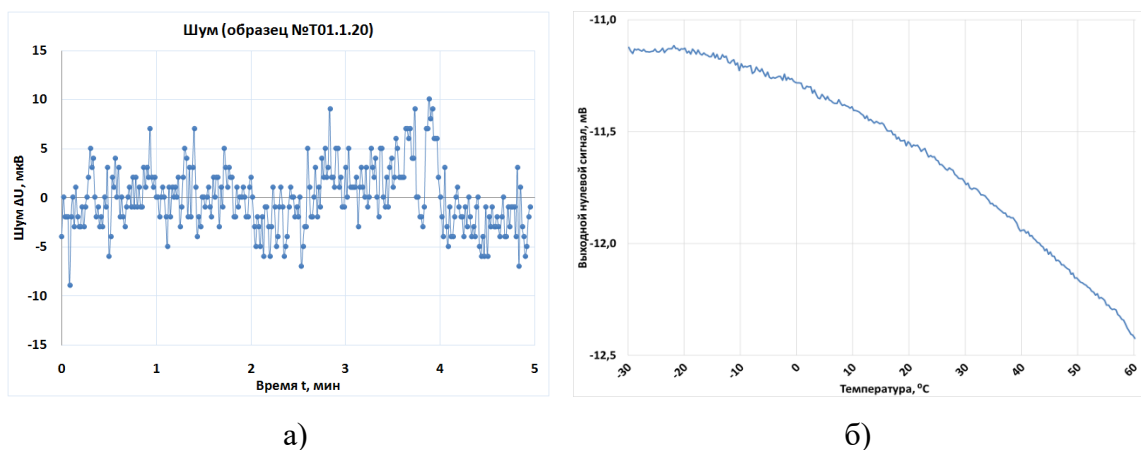


Рисунок 9 – Показатели выходных характеристик для нулевого сигнала от тензомодуля ТЖИУ.408854.047 с высокочувствительным малогабаритным кристаллом ТДК с ООС для диапазона до 10 кПа: а) шумовая составляющая, б) температурная зависимость

Параметры по температурным характеристикам для кристалла ТДК с ООС до 10 кПа для двух поддиапазонов температур и при рассмотрении подачи давления с двух сторон демонстрируют:

1. Одинаковые показатели с кристаллом ИПД52 по:
 - a. ТГН с пределом погрешности до 0,17 %;
 - b. ТКН с пределом погрешности до 0,27 %/10 °С;
 - c. ТКЧ с пределом погрешности до 2,70 %/10 °С;
2. Улучшенные показатели относительно кристаллам ИПД52 по ТГЧ с пределом погрешности до 0,19 % ($\text{ТГЧ}_{\text{ИПД52}} < 0,33 \%$).

При фактически одинаковых показателях момента разрушения мембраны для сверхвысокочувствительного малогабаритного кристалла ТДК с ООС и кристалла ИПД52 для ВПИ до 10 кПа $P_{\text{разруш ТДК с ООС для 10 кПа}} > 300 \text{ кПа}$ достигается преимущество по погрешности от механической перегрузки давлением $P_{\text{перегр}} = 60 \text{ кПа}$ соответственно, в 6 раз превышающей значения рассматриваемого ВПИ для разработки:

1. со стороны мембраны для ТДК с ООС $dU_{\text{перегр ТДК с ООС для 10 кПа}} = 0,013 \pm 0,013 \%$ и для ИПД52 $dU_{\text{перегр ИПД52 для 10 кПа}} = 0,038 \pm 0,036 \%$.
2. с лицевой стороны кристалла для ТДК с ООС $dU_{\text{перегр ТДК с ООС для 10 кПа}} = 0,008 \pm 0,008 \%$ и для ИПД52 $dU_{\text{перегр ИПД52 для 10 кПа}} = 0,019 \pm 0,018 \%$.

Тензомодули со сверхвысокочувствительными малогабаритными кристаллами ТДК с ООС и ИПД52 для ВПИ до 10 кПа демонстрируют одинаковые значения погрешностей по временной стабильности для нулевого сигнала $dU_{\text{стаб}} = 0,02 \pm 0,02 \%$ и чувствительности $d\Delta U_{\text{стаб}} = 0,03 \pm 0,02 \%$. Окончательно формируя вывод сравнительного анализа для партии тензомодулей ДД с кристаллом ТДК с ООС и ИПД52, можно констатировать факты, что для одинаковых значений ВПИ до 10 кПа и напряжения питания схемы $U_{\text{пит}} = 5 \text{ В}$ предлагаемая разработка сверхвысокочувствительного малогабаритного кристалла ТДК с ООС способна сократить площадь кристалла ДД в 2,4 раза, увеличить чувствительность в 5,8 раз, а также сохранить показатели параметров по температурным характеристикам, временной стабильности и частично их улучшить (ТГЧ в 2,5 раза и погрешность по механической прочности в 2,7 раза).

5 образцов тензомодулей ТЖИУ.408854.047 полностью соответствуют техническим условиям на все выходные характеристики для гидроблоков ТЖИУ.406233.016, представленным в таблице 2.

Таблица 2 – Выходные характеристики 5 образцов тензомодулей ТЖИУ.408854.047 со сверхвысокочувствительным малогабаритным кристаллом ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа и граничные значения параметров, заявленные для гидроблоков ТЖИУ.406233.016

Наименование параметра (U _{пит} = 5 В)	Подача давл.	Обозна - чение	Един. изм.	Треб.	Диапазон давления до 10 кПа						
Старое наименования					T01.1. 65	T01.1. 72	T01.1. 79	T01.1. 80	T01.2. 67		
Новое наименование согласно КД на ТЖИУ.408854.047					ТДК22. 001	ТДК22. 002	ТДК22. 003	ТДК22. 004	ТДК22. 005		
Чувствительность P = 10 кПа	мембр	ΔU ₁₀	мВ	> 75	546,0	537,7	509,5	463,6	397,5		
	лиц				559,3	549,7	514,4	471,2	402,9		
Нелинейность P = 10 кПа	мембр	2K _{NL}	%	< 0,50	0,44	0,32	0,36	0,26	0,43		
	лиц				0,30	0,22	0,47	0,21	0,17		
Начальный сигнал	-	U ₀	мВ	< 15	12,91	-5,60	4,44	-13,11	-4,76		
Изменение нулевого сигнала после перегрузочного давления (P _{перегр} = 60 кПа)	мембр	dU _{перегр}		< 0,10	0,015	0,003	0,001	0,003	0,025		
	лиц				0,006	0,003	0,003	0,003	0,001		
Температурный гистерезис нулевого сигнала в диапазоне от -55 до +25 °С	мембр	ТГН	%	< 0,30	0,02	0,08	0,14	0,07	0,09		
	лиц				0,02	0,08	0,14	0,07	0,09		
Температурный гистерезис нулевого сигнала в диапазоне от +25 до +55 °С	мембр				0,05	0,09	0,12	0,09	0,06		
	лиц				0,05	0,09	0,12	0,09	0,06		
Температурный гистерезис чувствительности в диапазоне от -55 до +25 °С	мембр	ТГЧ			0,00	0,10	0,16	0,16	0,08		
	лиц				0,06	0,11	0,17	0,07	0,04		
Температурный гистерезис чувствительности в диапазоне от +25 до +55 °С	мембр				0,15	0,03	0,03	0,02	0,20		
	лиц				0,06	0,03	0,03	0,06	0,20		
Температурный коэффициент нулевого сигнала в диапазоне от +5 до +25 °С	мембр	ТКН			%/ 10 °С	< 3,5	0,14	0,11	0,15	0,06	0,17
	лиц						0,14	0,11	0,14	0,06	0,17
Температурный коэффициент нулевого сигнала в диапазоне от +25 до +45 °С	мембр						0,13	0,09	0,07	0,05	0,14
	лиц						0,13	0,09	0,07	0,05	0,13
Температурный коэффициент чувствительности в диапазоне от +5 до +25 °С	мембр	ТКЧ	2,17	2,24			2,34	2,21	2,16		
	лиц		2,21	2,23			2,29	2,17	2,16		
Температурный коэффициент чувствительности в диапазоне от +25 до +45 °С	мембр		2,44	2,22			2,41	1,85	1,69		
	лиц		2,66	2,59			2,11	2,04	1,71		
Временная стабильность нулевого сигнала (за 9 часов)	мембр	dU _{стаб}	%	< 0,10			0,02	0,00	0,01	0,04	0,02
	лиц						0,02	0,00	0,01	0,04	0,02
Временная стабильность чувствительности (за 9 часов)	мембр	dΔU _{стаб}					0,04	0,05	0,05	0,03	0,04
	лиц						0,01	0,02	0,01	0,05	0,02

Из 18 образцов тензомодулей ТЖИУ.408854.047 со сверхвысокочувствительным малогабаритным кристаллом ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа были отобраны 5 образцов с наилучшими выходными характеристиками для применения в составе сборочной конструкции гидроблоков ТЖИУ.406233.016 датчиков давления ТЖИУ406-М100. Проведенные исследования для тензомодуля ТЖИУ.408854.047 со сверхвысокочувствительным малогабаритным кристаллом ТДК с ООС для ВПИ до 10 кПа подтвердили возможность использования разработки в составе сборочной конструкции гидроблоков ТЖИУ.406233.016 (дифференциальное давление с ВПИ до 10 кПа) датчиков

давления ТЖИУ406-М100. По решениям для преобразователей давления ТДК с ООС получены патенты № RU 195159 U1 от 13.06.2019 и № RU 195160 U1 от 13.06.2019, использование которых документально подтверждено «Актом о внедрении результата интеллектуальной деятельности № T0522-05/028-2022 от 24.06.2022 и № T0522-05/029-2022 от 24.06.2022» во ФГУП «ВНИИА».

Заключение

Основной научный результат диссертации по поставленной цели был достигнут. Результат заключается в разработке и исследовании по реализации схемотехнического решения для повышения чувствительности и минимизация габаритных размеров тензорезистивных преобразователей давления при сохранении входных условий по геометрии механической структуры мембраны, напряжению питания и низких показателей погрешностей. Для кристалла ТДК с ООС применены оригинальные схемотехнические решения построения электрических схем для измерения давления, наиболее эффективная из которых использует недеформируемые БТ с вертикальной структурой п-р-п-типа (V-NPN) с восьмью ТР р-типа, расположенных в местах концентрации максимальных МН с определенной полярностью по изменению сопротивления от воздействия давления.

Основные теоретические результаты:

1. На основе актуализации рассмотренных исследований для тензорезистивных преобразователей давления рассмотрены вопросы балансного достижения чувствительности, габаритных размеров и погрешностей. На основе рассмотренных вопросов в обзоре предлагаются оригинальные решения применения схемотехнических решений, представленных в диссертации.
2. Обосновано и распространено применение теории тензорезистивного и пьезопереходного эффектов для создания тензорезистивных преобразователей давления.
3. Разработана модель функционирования преобразователя давления с электрической схемой в виде дифференциального каскада, с учетом обоснованного использования теории тензорезистивного и пьезопереходного эффектов, которая отличается от известных мостовых схем включением двух деформируемых биполярных транзисторов и четырёх тензорезисторов к областям базы и коллектора биполярных транзисторов. Теоретически доказана возможность увеличения чувствительности относительно применения электрической схемы в виде резистивного моста в 2,2 раза.

4. Разработана модель функционирования преобразователя давления по предлагаемому схемотехническому решению построения электрических схем в виде дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией, которая отличается от известных мостовых схем включением большего количества деформируемых резисторов. Обоснованы предложения по возможности повышения чувствительности и понижению погрешностей по температурной и шумовой зависимости выходного сигнала. Теоретически доказана возможность увеличения чувствительности относительно применения электрической схемы в виде резистивного моста до 3,9 раз.

Основные практические результаты:

1. Исследованы выходные характеристики разработанного тензорезистивного преобразователя давления ТДК с электрической схемой в виде дифференциального каскада в сравнительном анализе относительно аналогов с мостовой схемой для диапазона давления до 60 кПа, подтверждающие возможность повышения чувствительности в 2,2 раза при сохранении входных условий по геометрии механической структуры мембраны и напряжению питания.

2. Исследованы выходные характеристики разработанного тензорезистивного преобразователя давления ТДК с ООС с электрической схемой в виде дифференциального каскада с отрицательной обратной связью и термокомпенсацией в сравнительном анализе относительно аналогов с мостовой схемой для диапазонов давления до 60, 160 и 600 кПа, подтверждающие возможность повышения чувствительности в 3,5 раза, при сохранении входных условий по геометрии механической структуры мембраны, напряжению питания и низким показателям погрешностей; или минимизации габаритных размеров в 2,4 раза при сохранении показателей чувствительности. Подтверждена возможность уменьшения шумовой составляющей сигнала в 20 раз и погрешностей по температурным характеристикам более чем на порядок относительно параметров тензорезистивного преобразователя давления ТДК с электрической схемой в виде дифференциального каскада.

3. Проведена модернизация конструкции сверхвысокочувствительного малогабаритного преобразователя давления ТДК с ООС с наиболее эффективным схемотехническим решением (по п. 1) для измерения диапазона до 10 кПа. Доказана актуальность применимости преобразователя давления ТДК с ООС в составе сборочных конструкций гидроблоков ТЖИУ.406233.016 датчиков давления ТЖИУ406-М100.

4. Статистический анализ выходных характеристик партии сборочных конструкций ТЖИУ.4088554.047 с сверхвысокочувствительным малогабаритным преобразователем давления ТДК с ООС (по п. 2) подтвердил возможность одновременного увеличения чувствительности в 5,8 раз и сокращения площади преобразователя давления в 2,4 раза относительно аналога с электрической схемой резистивного моста при условии сохранения диапазона измеряемого давления до 10 кПа и низких показателей погрешностей.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации:

1. M. Basov, High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation // Sensors and Actuators A: Physical, 303 (2020) 111705.
2. M. Basov, Ultra-High Sensitivity MEMS Pressure Sensor Utilizing Bipolar Junction Transistor for Pressures Ranging from -1 to 1 kPa, IEEE Sensors Journal 21 (2021) pp. 4357-4364.
3. M. Basov, Development of High-Sensitivity Pressure Sensor with On-chip Differential Transistor Amplifier // Journal of Micromechanics and Microengineering, 30 (2020) 065001.
4. M. Basov, High Sensitive, Linear and Thermostable Pressure Sensor Utilizing Bipolar Junction Transistor for 5 kPa // IOP Physica Scripta, 96 (2021) 065705.
5. M. Basov, D. Prigodskiy, Development of High-Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors for -0.5...+0.5 kPa // Journal of Micromechanics and Microengineering, 30 (2020) 105006.
6. M. Basov, D. Prigodskiy, Investigation of High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors at Ultra-Low Differential Pressures // IEEE Sensors Journal, 20 (2020) pp. 7646-7652.
7. Басов М.В., Пригодский Д.М., Холодков Д.А. Моделирование чувствительного элемента датчика давления на основе биполярного транзистора // Датчики и системы, №6 (215), 2017, стр. 17-24.
8. Басов М.В., Пригодский Д.М. Исследование чувствительного элемента датчика давления на основе биполярного транзистора // Нано- и микросистемная техника, 19 (11), 2017, стр. 685-693.
9. Басов М.В., Химушкин Б.И., Холодков Д.А. Интегральный чувствительный элемент преобразователя давления на основе биполярного транзистора // Патент РФ. 2017. RU174159 U1.
10. Басов М.В., Химушкин Б.И. Интегральный высокочувствительный элемент на основе биполярного транзистора // Патент РФ. 2019. RU187760 U1.

11. Басов М.В., Химушкин Б.И. Интегральный чувствительный элемент на основе биполярного транзистора с термокомпенсацией // Патент РФ. 2019. RU187746 U1.
12. Басов М.В., Химушкин Б.И. Интегральный высокочувствительный элемент на основе вертикального биполярного транзистора // Патент РФ. 2020. RU 195159 U1.
13. Басов М.В., Химушкин Б.И. Интегральный чувствительный элемент на основе вертикального биполярного транзистора с термокомпенсацией // Патент РФ. 2020. RU 195160 U1.

Статьи и материалы конференций:

1. M. Basov. Pressure Sensor with Novel Electrical Circuit Utilizing Bipolar Junction Transistor // IEEE Sensors, 2021.
2. Басов М.В. Кристалл датчика давления с электрической схемой тензочувствительного дифференциального каскада с отрицательной обратной связью для диапазона до 5 кПа // XII Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике», 2021.
3. Басов М.В. Высокочувствительный кристалл датчика давления с термокомпенсацией на основе биполярного транзистора с горизонтальной структурой р-п-р-типа проводимости // XIV Российская конференция по физике полупроводников, 2019.
4. Басов М.В. Разработка чувствительного элемента давления на основе биполярного транзистора // V Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы микро- и нанoeлектроники», 2018.
5. Басов М.В. Разработка интегрального чувствительного элемента давления на основе биполярного транзистора // XIII Российская конференция по физике полупроводников, 2017.
6. Басов М.В. Исследование явления тензоэффекта на биполярном транзисторе // VIII Научно-техническая конференция молодых ученых «ВНИИА-2014».
7. Басов М.В. Чувствительный элемент датчика давления на основе биполярного транзистора // XI Научно-техническая конференция «ВНИИА-2017».
8. Басов М.В. Моделирование высокочувствительного элемента датчика давления на основе биполярного тензотранзистора // XII Научно-техническая конференция «ВНИИА-2018».
9. Басов М.В. Сверхвысокочувствительный кристалл датчика давления с повышенной механической прочностью // XIII Научно-техническая конференция «ВНИИА-2019».

Список использованных в автореферате источников литературы:

1. Li C., Cordovilla F., Jagdheesh R., Ocana J.L. Design Optimization and Fabrication of a Novel Structural SOI Piezoresistive Pressure Sensor with High Accuracy // *Sensors*. – 2018. – №18. – 39.
2. Tran A. V., Zhang X., Zhu B. The Development of a New Piezoresistive Pressure Sensor for Low Pressures // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2018. – №65. – P. 6487-6496.
3. Meng X., Zhao Y. The Design and Optimization of a Highly Sensitive and Overload-Resistant Piezoresistive Pressure Sensor // *Sensors*. – 2016. – №16. – 348.
4. Huang X., Zhang D. Structured diaphragm with a centre boss and four peninsulas for high sensitivity and high linearity pressure sensors // *Micro and Nano Letters*. – 2014. – №9. – P. 460-463.
5. Xu T., Zhao L., Jiang Z. A high sensitive pressure sensor with the novel bossed diaphragm combined with peninsula-island structure // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2016. – №244. – P. 66-75.
6. Tian B., Zhao Y., Jiang Z., Hu B. The design and analysis of beam-membrane structure sensors for micro-pressure measurement // *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – №83. – 045003.
7. Sandvand Å., Halvorsen E., Aasmundtveit K. E., Jakobsen H. Identification and Elimination of Hygro-Thermo-Mechanical Stress-Effects in a High-Precision MEMS Pressure Sensor // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2017. – №26. – P. 415-423.
8. Беклемишев В.В., Ваганов В.И., Сумин А.В. Электронная измерительная техника. Интегральные преобразователи давления на основе планарных и продольных транзисторов – Сборник статей под редакцией д.т.н. профессора А.Г. Филиппова – Москва: Атомиздат, 1978, 181 с.
9. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи – Москва: Энергоатомиздат, 1983, 183 с.
10. Fruett F., Meijer G. The piezjunction effect in silicon integrated circuits and sensors – Delft: Springer, 2002, 214 p
11. Hafez N., Haas S., Loebel K. Characterisation of MOS Transistors as an Electromechanical Transducer for Stress // *Physica Status Solidi A*. – 2018. – № 1700680. – P. 1-13.
12. Singh P., Jianmin Miao J., Shao L. Microcantilever sensors with embedded piezoresistive transistor read-out: Design and characterization // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2011. – № 171. –P. 178-185.

13. Шелепин Н.А. Кремниевые преобразователи физических величин и компоненты датчиков. Датчики и микросистемы на их основе // Микросистемная техника. – 2002 – №9 – С. 2-10.

14. Шелепин Н.А. Кремниевые микросенсоры и микросистемы: от бытовой техники до авиационных приборов // Микросистемная техника. – 2000 – №1 – С. 10.

15. Шелепин Н.А., Данилова Н.Л., Панков В.В., Суханов В.С. Преобразователи давления – микросхемы серии 1191, 1192 // Датчики и системы. – 2007 – №1 – С. 28-33.