

На правах рукописи

Скворцов Павел Аркадьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ТЕНЗОДАТЧИКА НА СТРУКТУРЕ
«КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

Научный руководитель

Гаврюшин Сергей Сергеевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дмитриев Владимир Георгиевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
профессор кафедры «Машиноведение и детали машин»

Хроматов Василий Ефимович
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
профессор кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Защита состоится 19 декабря 2019 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.059.06 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: 119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМАШ РАН по адресу: 119334, г. Москва, ул. Бардина д.4, www.imash.ru

Автореферат разослан 18 октября 2019 года.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук

Г.Н. Гранова

Актуальность темы. Измерение давления жидких и газообразных сред является важной инженерной задачей. Благодаря активному развитию микроэлектроники и вычислительной техники, сегодня отдельную группу приборов, успешно справляющихся с данной задачей, представляют полупроводниковые тензодатчики. Благодаря высокой чувствительности электрических характеристик полупроводников к различным внешним воздействиям, общности исходных материалов для изготовления преобразователей, а также единству технологии изготовления, полупроводниковые датчики давления на сегодняшний день представляют класс высокоточных приборов, работоспособных при различных условиях окружающей среды.

Особую группу представляют датчики давления, выполненные на структуре «кремний на сапфире» (КНС). Основными преимуществами таких тензодатчиков, являются высокая чувствительность, радиационная стойкость и широкий диапазон рабочих температур. В настоящее время производством таких датчиков в нашей стране занимаются такие организации как ПГ МИДА (г.Ульяновск), ЭПО Сигнал (г. Энгельс), ЗАО НПК ВИП (г. Екатеринбург), ОАО НИИФИ (г. Пенза), ПГ Метран (г. Челябинск), а к числу зарубежных производителей следует отнести компании Honeywell (США), Kulite Semiconductor Products (США), Yokogawa (Япония), Druck (Англия), Sensonetics (США).

Несмотря на то, что тензоэффект в полупроводниках был открыт более 50 лет назад, а полупроводниковые тензодатчики сегодня активно используются в различных сферах деятельности, на сегодняшний день расчет и проектирование данного типа датчиков представляет весьма сложную и наукоемкую задачу. Следует отметить, что сегодня вопросу расчета и проектирования полупроводниковых тензодатчиков не уделяется должное внимание. Аналитические выражения, описывающие деформацию упругих элементов, а также поведение различных материалов при деформации не могут быть использованы при расчете и проектировании полупроводниковых тензодатчиков, т.к. в данном случае распределение деформаций на поверхности чувствительного элемента весьма отличается от классического. Известные разработки датчиков основаны преимущественно на практическом опыте и интуиции разработчиков, что затрудняет проектирование новых более совершенных датчиков.

В последнее время для расчетов активно применяются численные методы (например, метод конечных элементов), а также различные программно-вычислительные комплексы (ANSYS, Abaqus, Nastran и т.п.). Однако расчеты, выполненные численными методами, не позволяют формулировать какие-либо соотношения в общей форме и нуждаются в

проверке адекватности модели. Зачастую процесс расчета требует весьма много времени (например, для построения сетки при варьировании геометрических параметров), а инженер должен владеть не только навыками работы с тем или иным программно-вычислительным комплексом, но и знать все особенности применения метода конечных элементов. Все это делает процесс проектирования весьма длительным и трудоёмким, что, в конечном счете, может привести к недостаточной точности расчетов, к увеличению погрешности при работе прибора, а также низкому проценту выхода годных изделий.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью решения важной и наукоемкой задачи, связанной с расчетом и проектированием упругих элементов полупроводниковых тензодатчиков на КНС-структуре с целью уменьшения погрешности измерений, облегчения процесса настройки датчиков и увеличения процента выхода годных изделий.

Целью диссертационной работы является:

- разработка методики многокритериального проектирования упругого элемента полупроводникового тензодатчика на структуре «кремний на сапфире»,

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать модель полупроводникового тензодатчика на КНС;
- используя модель, создать методику, позволяющую проводить многокритериальную оптимизацию полупроводникового датчика на структуре «кремний на сапфире»;
- реализовать методику многокритериального проектирования в виде авторской программы с дружественным интерфейсом;
- экспериментально проверить результаты расчетов.

Объектом исследования является упругий элемент полупроводникового датчика давления, выполненного на структуре «кремний на сапфире».

Предметом исследования является многопараметрический процесс нелинейного деформирования упругого элемента датчика, выполненного на структуре КНС.

Научная новизна:

- Разработаны методика и алгоритм многокритериального проектирования полупроводникового датчика давления на КНС;
- Получены новые теоретические и экспериментальные результаты, проясняющие зависимость между параметрами управления и параметрами качества;

- Методика и алгоритм оптимизации реализованы в виде авторской программы на языке C# с дружественным интерфейсом, позволяющие проектировщику выбрать рациональные варианты конструкций.

На защиту выносятся следующие положения:

- 1) Разработана методика многокритериального проектирования упругого элемента полупроводникового тензодатчика на структуре «кремний на сапфире».
- 2) Получены новые теоретические и экспериментальные результаты, проясняющие взаимосвязь между параметрами управления и параметрами качества.
- 3) Создана авторская программа на языке C#, реализующая методику многокритериального проектирования.
- 4) Получены новые рациональные варианты конструкций, превосходящие исходный вариант по всем параметрам качества.

Практическая ценность работы заключается в том, что программный продукт может быть использован для оптимизации серийно-выпускаемых тензодатчиков на КНС, что позволит получить приборы, превосходящие имеющиеся варианты конструкции по всем параметрам качества, а в случае уменьшения размеров чувствительного элемента возможно получение и положительного экономического эффекта.

Внедрение результатов работы осуществлено в расчетную практику предприятия ЭПО «Сигнал» (г. Энгельс). Программный продукт используется указанным предприятием для расчета и проектирования упругих элементов полупроводниковых датчиков давления на КНС. Использование результатов работы подтверждено актом о внедрении.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях:

- на Всероссийской конференции с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа» (ТПГУ, Тула 27 ноября – 1 декабря 2017 г.);
- на 1-ой Международной школе молодых учёных и специалистов в области робототехники, производственных технологий и автоматизации. «СТАНКИН», 2016.
- на 2-ой Международной школе молодых учёных и специалистов в области робототехники, производственных технологий и автоматизации. «СТАНКИН», 2017.
- на XXII Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятчи, 15–19 февраля 2016 г.):

- на XXIII Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова» (Вятчи, 13–17 февраля 2017 г.).
- на XXIV Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова» (Вятчи, 19–23 марта 2018 г.).
- на конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», (Москва, 2-5 октября, 2017 г.)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, из них 2 статьи в журналах перечня ВАК, 3 статьи в журналах, индексируемых в SCOPUS.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы, содержащего 137 наименований, приложений. Диссертация содержит 153 страницы основного текста, 96 рисунков, 4 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается важность и актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна работы, представлены достоверность и практическая ценность полученных результатов.

В первом разделе приводится сравнительный анализ современных полупроводниковых датчиков давления Отечественного и зарубежного производства.

В полупроводниковых датчиках на КНС чаще всего применяется упругий элемент мембранного типа. Основные принципы расчета упругих элементов хорошо изложены в работах В.И. Феодосьева, Л.Е. Андреевой, Э. Рейснера, Тимошенко и др.

Однако, хорошо зарекомендовавшие себя подходы при проектировании традиционных типов упругих элементов оказываются или совсем не пригодными для рассматриваемого класса изделий рис.1, либо не позволяют в полном объеме и с требуемой точностью учесть все особенности нелинейного деформирования. Анализ публикаций показал, что напряжения, возникающие на поверхности полупроводникового тензопреобразователя на КНС, отличаются от классической модели тем, что проникают за границы мембраны, в сторону жесткого основания. В связи с этим необходимо, для получения максимальной чувствительности, располагать центр базы тензорезистора на границе тонкой части мембраны.

Также при анализе существующих публикаций было выявлено, что явлением анизотропии сапфира на фоне разброса характеристик остальных

материалов при расчете упругого элемента полупроводникового датчика давления на КНС можно пренебречь.

Также было выявлено, что прочностные свойства серебряного припоя ПСР 72 практически не изучены, а в расчетах зачастую используют свойства чистого серебра.

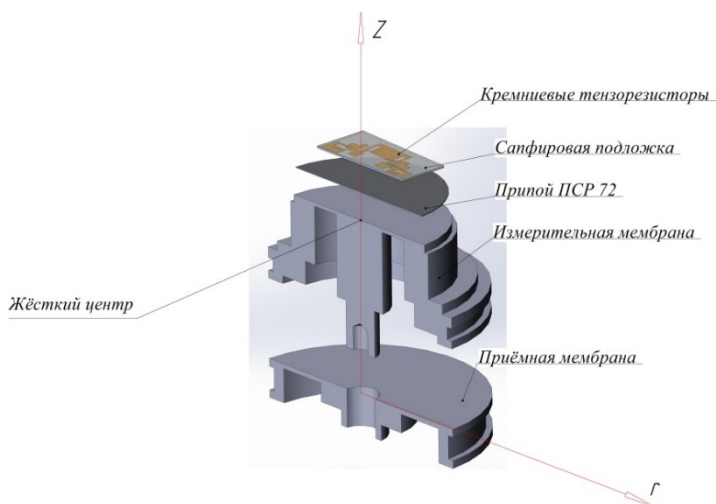


Рис. 1. Модель двухмембранного упругого элемента датчика давления на КНС

Вопросы оптимизации конструкции упругого элемента тензодатчика давления на КНС рассматриваются достаточно поверхностно. В существующих работах авторы не делают выводы относительно того, является ли полученная конструкция Парето-оптимальным вариантом или нет.

В работах по исследованию структуры КНС встречается упоминание о дефектном слое на границе сапфир-кремний, который может служить причиной дополнительных погрешностей при работе устройств, и который необходимо учесть при численном моделировании.

Было также выявлено, что исследования взаимосвязи конструкторских параметров и параметров качества полупроводниковых датчиков давления на КНС не проводились. Единая методика расчета и проектирования подобного рода устройств отсутствует. Большинство расчетов выполнены в геометрически-линейной постановке.

Во втором разделе проводится обзор аналитических выражений, позволяющих произвести расчет упругого элемента мембранного типа.

Для аналитического расчета НДС УЭ датчиков давления на КНС могут быть использованы выражения, полученные в теории изгиба круглых пластинок рис.2. Данные соотношения применимы в случае работы мембраны в области малых перемещений, когда перемещение мембраны возникает в основном за счет изгибных деформаций. Срединная плоскость практически не удлиняется и можно считать, что мембрана имеет линейную характеристику.

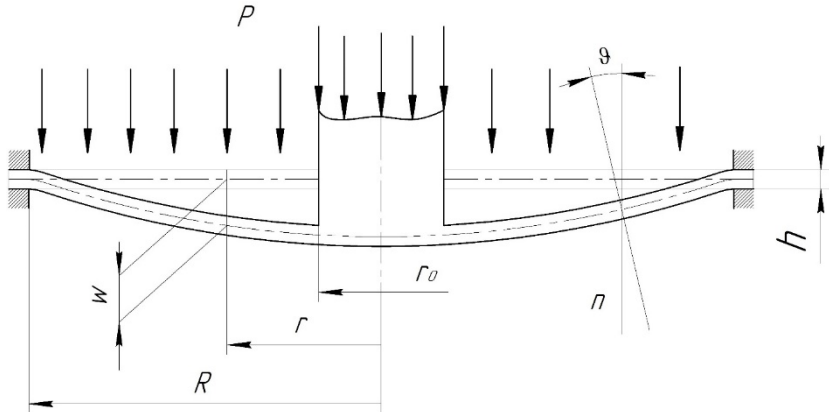


Рис.2. Расчетная схема плоской мембраны с жестким центром в области малых перемещений

Хочется отметить, что в литературе в явном виде нет выражений, описывающих распределение изгибных напряжений в радиальном σ_r и тангенциальном σ_t направлениях. Вывод данных уравнений произведем с помощью уравнения для угла поворота нормали к срединной поверхности:

$$\vartheta = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{pr^3}{16D}$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий:

$$\begin{cases} r = R, & \vartheta = 0 \\ r = r_0, & \vartheta = 0 \end{cases}$$

$$\text{Тогда: } C_1 = -\frac{P}{16D} (r_0^2 + R^2); C_2 = \frac{P}{16D} \frac{r_0^2 R^2 (r_0^2 + R^2)}{R^2 - r_0^2}$$

Выражения для напряжений в радиальном σ_r и тангенциальном σ_t направлениях в общем виде имеют вид:

$$\sigma_r = \frac{Ez}{1-\mu^2} (\vartheta' + \mu \frac{\vartheta}{r}); \sigma_t = \frac{Ez}{1-\mu^2} (\frac{\vartheta}{r} + \mu \vartheta')$$

Подставляя уравнение для угла поворота нормали и его производную в уравнения для напряжений, получим:

$$\sigma_r = \frac{Ez}{1-\mu^2} (C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3Pr^2}{16D} + \mu \left(C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{pr^2}{16D} \right))$$

$$\sigma_t = \frac{Ez}{1-\mu^2} (C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{pr^2}{16D} + \mu \left(C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{3Pr^2}{16D} \right))$$

Расчет прогиба мембраны может быть оценен аналитически по выражению:

$$w_0 = A_p \frac{pR^4}{Eh^3}$$

где w_0 – прогиб жесткого центра, p - давление, R – рабочий радиус мембраны, E – модуль Юнга, h – толщина мембраны, A_p – коэффициент, учитывающий отношение рабочего радиуса R к радиусу жесткого центра r_0 . Коэффициент A_p определяется соотношением:

$$A_p = \frac{3(1-\mu^2)c^4 - 1 - 4c^2 \ln c}{16c^4}, \text{ где } c = \frac{R}{r_0}, \mu - \text{ коэффициент Пуассона.}$$

Максимальные радиальные напряжения σ_r и окружные напряжения σ_t на поверхности плоской мембраны с жестким центром находятся у заделки и описываются выражениями:

$$\sigma_r = B_p \frac{Ehw_0}{R^2}, \text{ где } B_p = \frac{4}{1-\mu^2} \frac{c^2(c^2-1)}{c^4-1-4c^2 \ln c}; \sigma_t = \mu \sigma_r$$

Графики изгибных напряжений для плоской мембраны с жестким центром $r_0=2$ мм, рабочим радиусом $R=5,7$ мм, толщиной $h=0,23$ мм, изготовленной из материала с характеристиками $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$ приведены на рис.3. Распределение деформаций по поверхности плоской мембраны с жестким центром показано на рис. 4. Зависимость прогиба центра мембраны от давления приведена на рис.5.

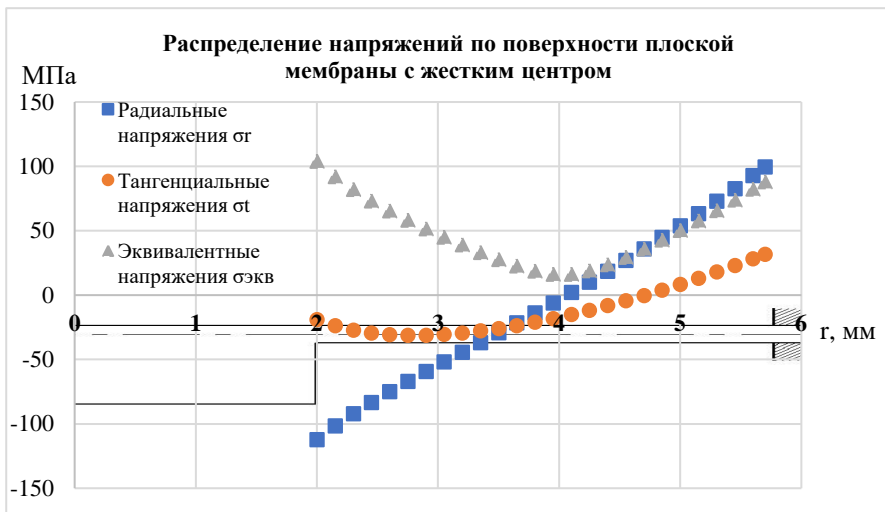


Рис.3. Распределение напряжений по поверхности плоской мембраны с жестким центром

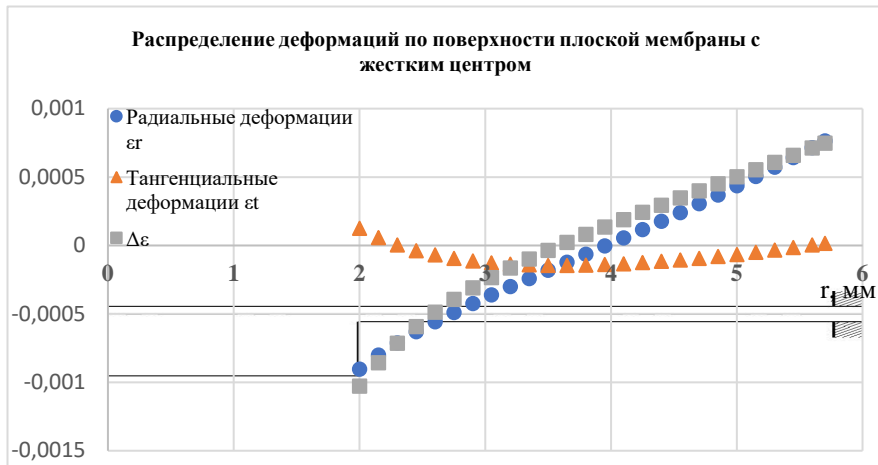


Рис.4. Распределение деформаций по поверхности плоской мембраны с жестким центром

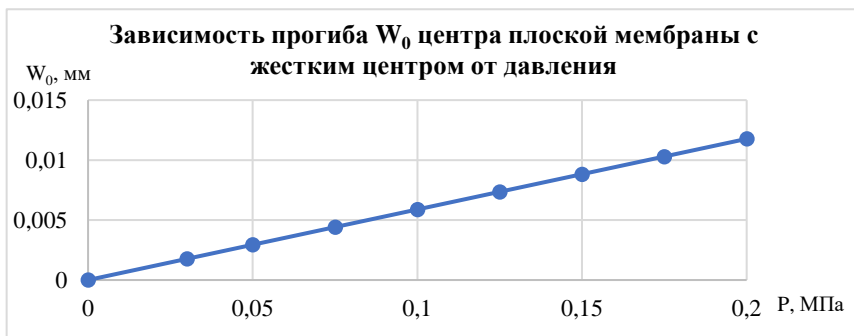


Рис.5. Зависимость прогиба W_0 центра плоской мембраны с жестким центром от давления

Линейная теория изгиба круглых пластинок ограничивает возможности расчета мембраны, т.к. получается, что при большом запасе прочности по эквивалентному напряжению центр мембраны получает перемещение, соизмеримое с толщиной, что противоречит допущению о малости перемещений и не позволяет проводить дальнейший расчет, используя данные выражения.

Ввиду этого в данной работе был также осуществлен расчет по теории абсолютно гибкой мембраны и по уточненной теории, согласно которой напряжения в мембране можно представить как сумму изгибных напряжений и напряжений растяжения в срединной поверхности. Результаты расчета плоской мембраны с рабочим радиусом $R=5,7$ мм, толщиной $0,23$ мм, изготовленной из материала с характеристиками $E=118$ ГПа, $\mu=0,3$ приведены на рис.6.

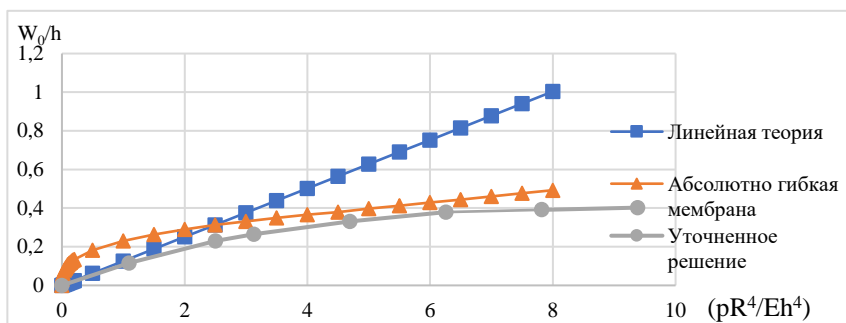


Рис.6. Характеристики мембраны, полученные по разным теориям

Таким образом, ни одна из аналитических теорий должным образом не описывает поведение реальной конструкции в условиях нагружения. Вероятно, это связано с геометрией поверхности упругого элемента и наличием нескольких материалов в составе конструкции. Согласно аналитическому расчету, центр мембраны под действием номинального давления переместится примерно на 300 мкм. На практике такого быть не может, т.к. подобное перемещение приведет к возникновению напряжений в ЧЭ, которые значительно превосходят предел прочности. Ввиду этого целесообразно провести численное моделирование тензопреобразователя давления на КНС в программном продукте ANSYS.

В третьем разделе проводится экспериментальное исследование структуры КНС методом растровой электронной микроскопии и исследование прочностных свойств сплава, состоящего из 72 % серебра и 28 % меди. Данный сплав является аналогом серебряного припоя ПСр 72, прочностные свойства которого до сих пор не изучены.

На рис. 7-9 приведены фотографии структуры «кремний на сапфире», полученные с микроскопа helios 660 nanolab.

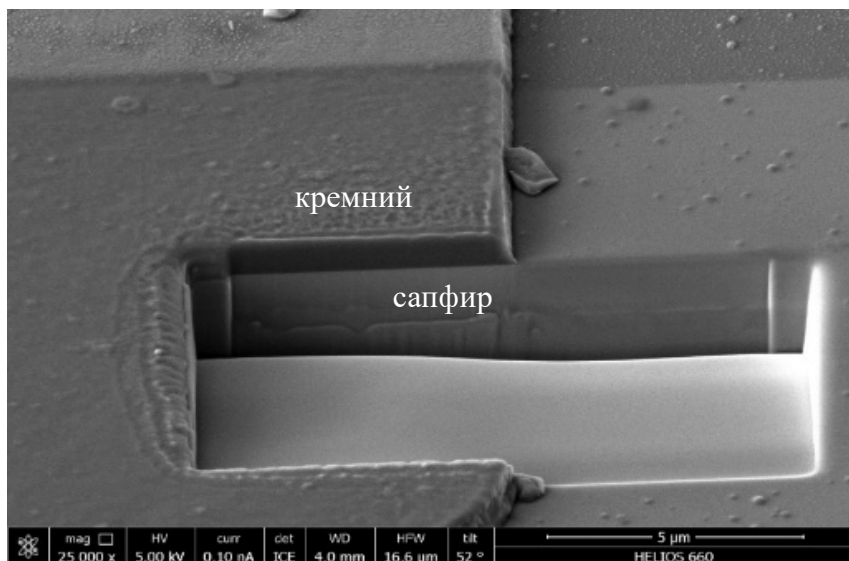


Рис. 7. Технологический разрез в структуре КНС

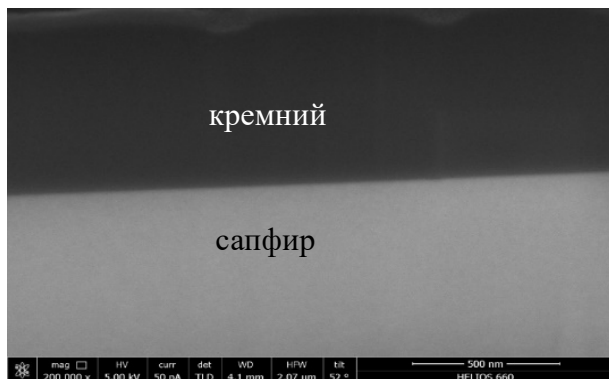


Рис.8. Фотография границы кремний-сапфир, полученная с микроскопа helios nanolab 660

В ходе исследования удалось точно измерить толщину слоя кремния (0,8 мкм) и толщину сапфировой подложки (68,69 мкм). На основе полученных данных определены значения средних термических напряжений, возникающих в слое кремния и в слое сапфира при эпитаксии. В нашем случае напряжение в сапфировой подложке составило 19 МПа, напряжение в слое кремния 607 МПа, что свидетельствует о превышении предела текучести кремния, что приводит к зарождению дислокаций несоответствия, что в будущем возможно будет являться одной из причин нелинейности выходного сигнала.

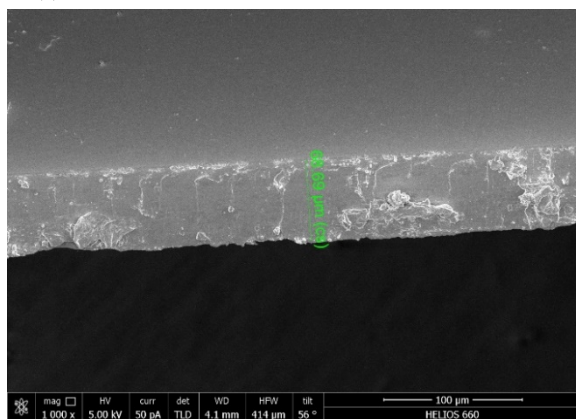


Рис.9. Фотография сапфировой подложки, полученная с микроскопа helios nanolab 660

В ходе испытаний образцов из сплава (72 % Ag, 28 % Cu) рис.10 были определены необходимые для численного моделирования параметры: модуль упругости материала $E = 88$ ГПа, предел прочности $\sigma_b = 372$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 230$ МПа; а также была построена диаграмма зависимости напряжений от относительной деформации рис.11.



Рис.10. Исходный образец, разрывная машина МИ-40КУ, образец после разрушения

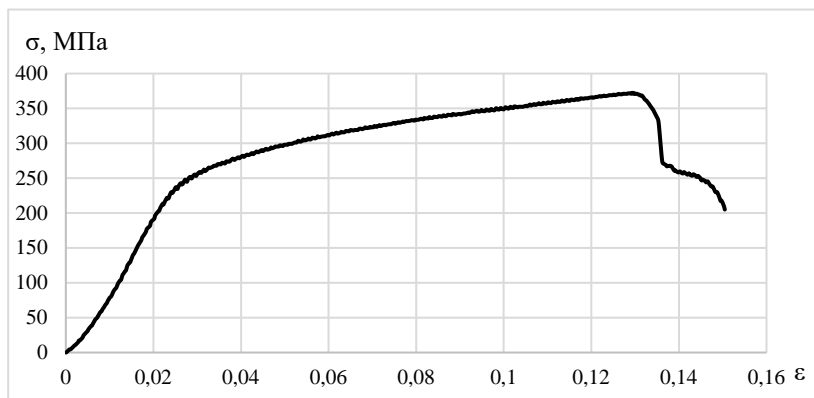


Рис.11. Диаграмма растяжения образца из сплава (72% Ag, 28% Cu)

В четвертом разделе проведён прочностной расчет упругого элемента серийно выпускаемого тензодатчика на структуре «кремний на сапфире». На основе производственной документации была построена модель конструкции, заданы свойства материалов (табл. 1). На рис.12 изображена расчетная схема объекта в двумерной системе координат.

На практике соединение сапфира с металлом осуществляется посредством пайки, которая обеспечивает надежное соединение полупроводникового чувствительного элемента с материалом мембраны. В настоящее время для пайки обычно используется припой Пср72. Механические свойства слоя припоя практически не изучены, поэтому при расчетах были взяты свойства сплава (72% Ag, 28 % Cu), экспериментально определённые в третьем разделе. Физические свойства материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства материалов

материал	модуль упругости, E , ГПа	коэффициент Пуассона, μ	Предел текучести, σ_{02} , МПа	Предел прочности, σ_b , МПа
Титан (BT9)	118	0,34	980	1150
Серебро(Ag)	80	0,37	30	160
Сапфир (Al_2O_3)	382	0,27	-	895
Сплав 72% Ag, 28% Cu	88	0,37	230	372
Сапфир (Al_2O_3)	382	0,27	-	895
Кремний (Si)	130	0,28	-	500

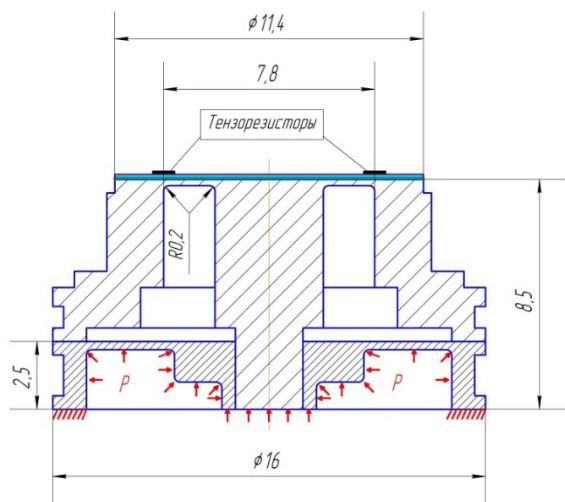


Рис.12. Расчетная схема объекта

В работе применялась конечно-элементная дискретизация конструкции с помощью восьмиузлового осесимметричного элемента Plane 183. Для решения данной задачи использовалась опция осесимметричной двумерной задачи. Слой кремния, в силу малой толщины (1мкм), в расчете не учитывался. В процессе дискретизации было применено локальное сгущение сетки вблизи концентраторов напряжений. Качество разбиения оценивалось известным эмпирическим правилом двукратного сгущения сетки. Решение проводилось в геометрически нелинейной постановке. Согласно ГОСТ 22520-85 рассчитываемый датчик должен выдерживать давление перегрузки на 25% большее, чем номинальное давление. Результаты численного моделирования приведены на рис.13-17. Для сравнения результатов расчета и оценки нелинейности конструкции, использовалась величина прогиба измерительной мембраны. Визуально характеристика прогиба измерительной мембраны рассматриваемого датчика представляет прямую, однако численный анализ показал, что нелинейность присутствует и равна 0,14%. При проектировании полупроводниковых датчиков давления даже такая малая величина нелинейности может вносить серьезный вклад в точность измерений. Поэтому ею нельзя пренебрегать, а наоборот стоит использовать как один из параметров качества изделия. Также численный расчет показал, что если прочностные свойства припоя принять равными

прочностным свойствам серебра, то в слое припоя возникнут напряжения, численно превосходящие предел текучести серебра (рис.17).

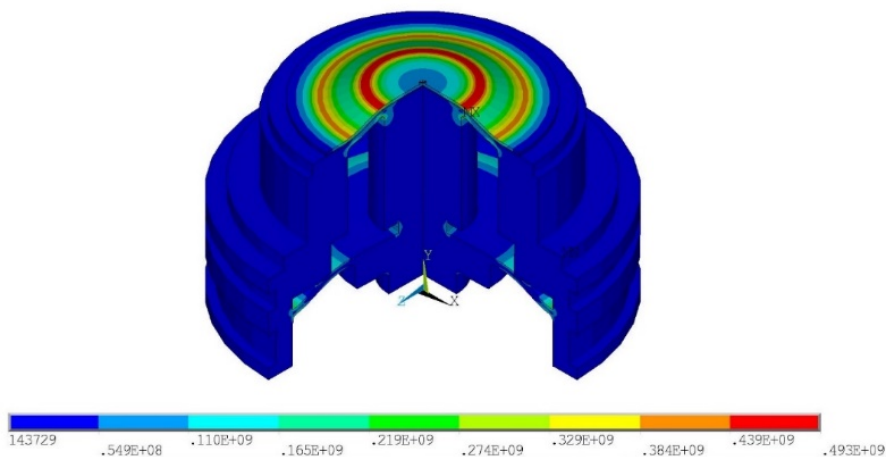


Рис.13. Напряжения по Мизесу в двухмембранном упругом элементе полупроводникового датчика давления на КНС

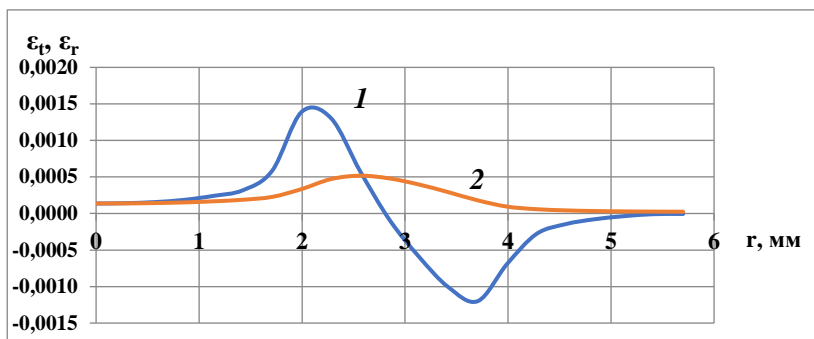


Рис.14. Распределение деформаций в радиальном направлении (r) и тангенциальном направлении (t) на поверхности чувствительного элемента:

- 1 – радиальная деформация (ϵ_r);
- 2 – тангенциальная деформация (ϵ_t).

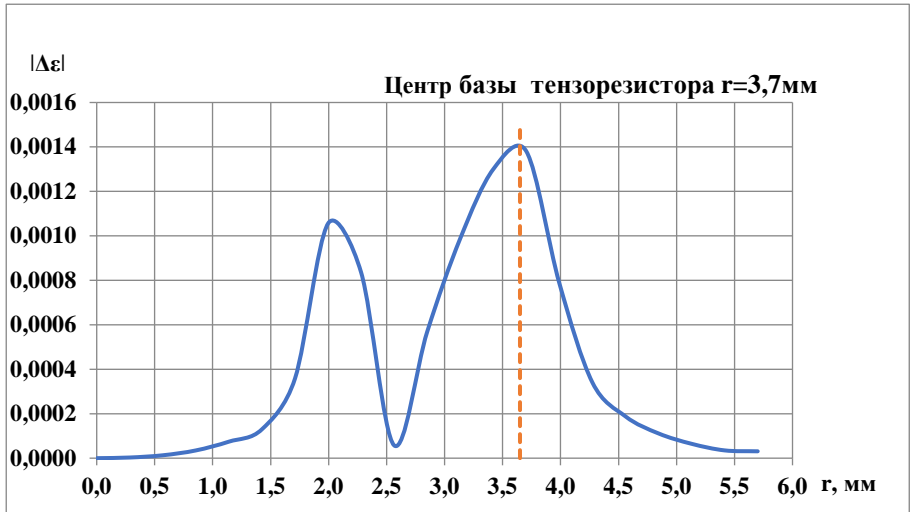


Рис.15. Разность радиальных и тангенциальных деформаций $|\Delta\varepsilon|$ на поверхности чувствительного элемента

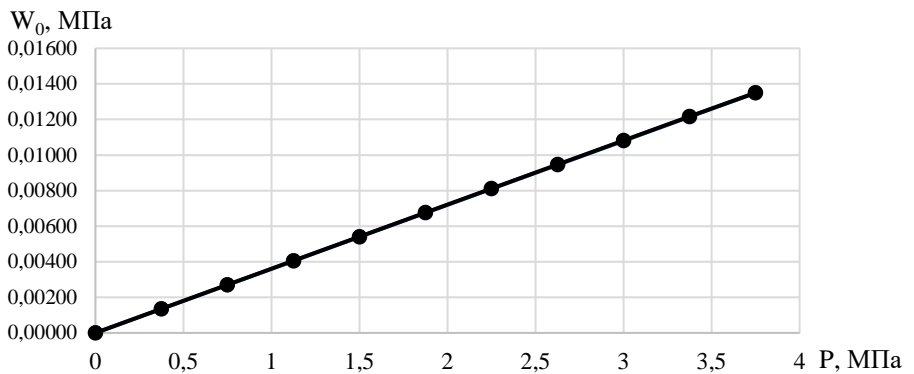


Рис.16. Перемещение центра измерительной мембраны. Нелинейность 0,14%

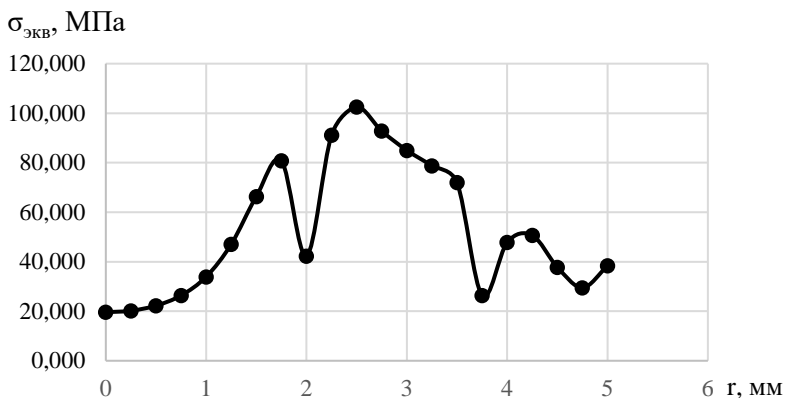


Рис.17. Напряжения по Мизесу в слое припоя

В пятом разделе приводятся основные сведения по многокритериальной оптимизации и разработанный авторский алгоритм оптимизации, реализованный в виде программы на языке С# с дружественным интерфейсом. Наиболее наглядно схема многокритериальной оптимизации представлена на рис.18. На практике вместо одного лица, назначающего параметры управления, параметры качества, функциональные и критериальные ограничения, может выступать группа специалистов, состоящая, например, из конструкторов и технологов. В нашем случае в качестве параметров управления были приняты некоторые геометрические размеры мембран. Разработанная авторская программа позволяет использовать в качестве параметров управления все геометрические размеры, указанные в конструкторской документации, а также свойства материалов. Выбор пробных точек для расчета осуществляется на основе ЛП_t последовательности, количество точек указывается пользователем. Алгоритм оптимизации был реализован на языке С#. **Программа позволяет:**

- 1) Задавать вариацию отдельных параметров и формировать макрос этой вариации на языке APDL. Для работы программе необходима параметризованная модель расчета.
- 2) Запускать макрос вариации на расчет в ANSYS в пакетном режиме без участия пользователя. Результаты вариации подхватываются программой также в автоматическом режиме.
- 3) Оценивать параметры качества: нелинейность выходной характеристики, максимальные эквивалентные напряжения, рабочий коэффициент передачи. Также программой осуществляется выбор

рациональной позиции тензорезисторов на поверхности упругого элемента.

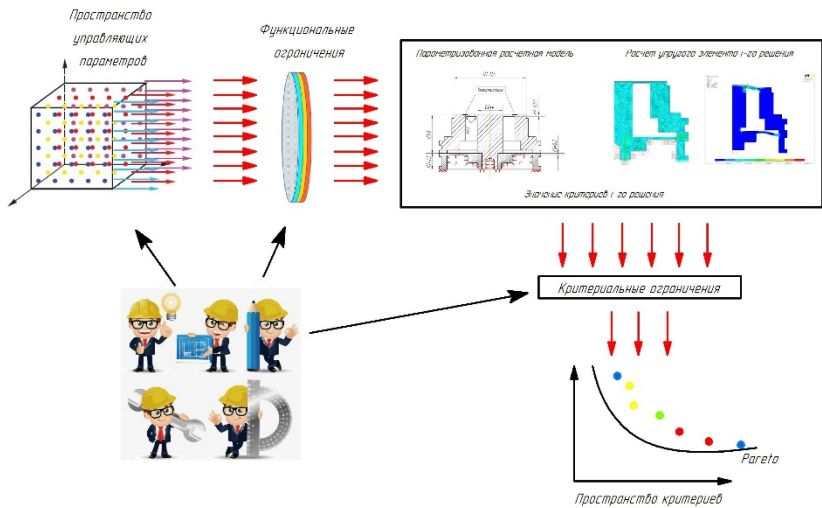


Рис.18. Схема многокритериальной оптимизации

В процессе оптимизационного расчета было рассчитано 200 вариаций, количество допустимых вариаций составило 169, из них Парето-оптимальных 7. В результате расчета были получены варианты конструкций тензопреобразователя, превосходящие исходный вариант по всем параметрам качества. Интерфейс авторской программы представлен на рис.19,20.

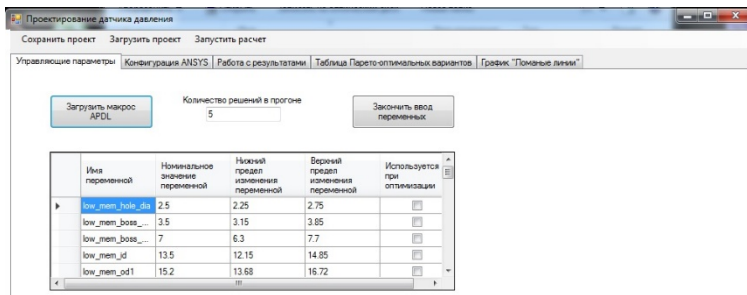


Рис.19. Пользовательский интерфейс программы. Окно ввода параметров управления

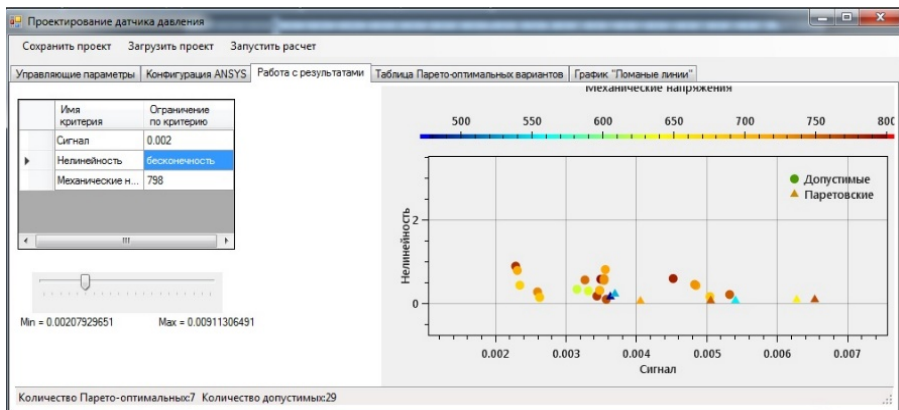


Рис.20. Пользовательский интерфейс программы. Множество вариантов, полученных в ходе решения

В шестом разделе приводятся результаты многокритериальной оптимизации. Основным результатом является получение конструкции, превосходящей базовый вариант по всем параметрам качества (нелинейность, максимальный выходной сигнал, максимальные эквивалентные напряжения) таблица 2.

Таблица 2. Сравнение вариантов конструкции

Параметры качества	Базовый вариант конструкции	Парето-оптимальный вариант №1	Парето-оптимальный вариант №2	Парето-оптимальный вариант №3
$\sigma_{\text{экв макс}}$, МПа	798	841,4	683,6	678
Нелинейность выходной характеристики, %	0,39	0,135	0,042	0,29
Рабочий коэффициент передачи, мВ/В	4,6	6,9	5,2	3,0

В ходе эксперимента было получено подтверждение результатов расчета. Для проведения эксперимента была изготовлена партия датчиков, которые в дальнейшем прошли проверку по методике, применяемой для серийно-выпускаемых тензодатчиков. Результаты эксперимента приведены на рис.21,22.

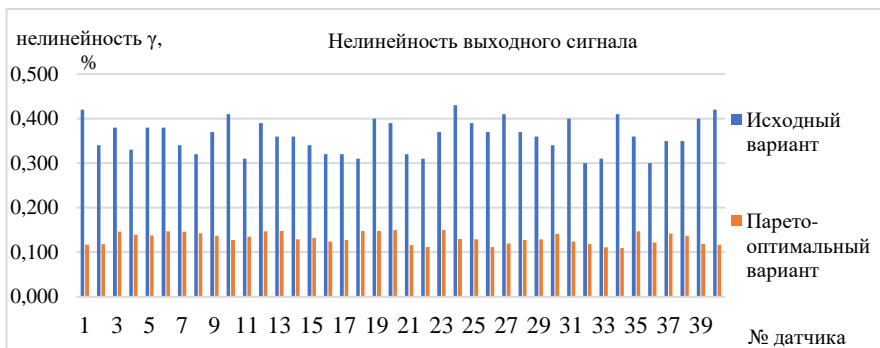


Рис.21. Сравнительный анализ по величине нелинейности выходного сигнала серийно-выпускаемого и полученного в ходе оптимизационного расчета датчиков давления

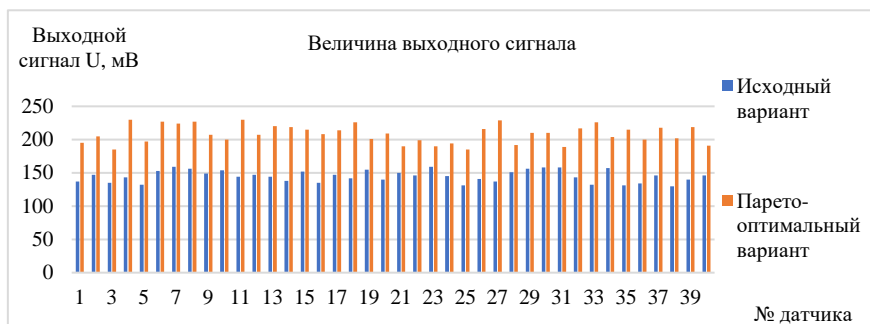


Рис.22. Сравнительный анализ по величине выходного сигнала серийно-выпускаемого и полученного в ходе оптимизационного расчета датчиков давления

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В работе проведен прочностной расчет упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире» по аналитическим выражениям и в программном продукте ANSYS. Получены: значение максимального эквивалентного напряжения на поверхности чувствительного элемента 439 МПа, прогиб центра чувствительного элемента 0,0138 мм, распределение

радиальной и тангенциальной деформаций по поверхности ЧЭ. Определено место наилучшего расположения тензорезистора.

2. Экспериментально исследована структура КНС. Определена толщина кремнивого слоя 0,8 мкм, сапфировой подложки 68,69 мкм. Определены максимальные напряжения, возникающие при эпитаксии: в слое кремния 607 МПа, в сапфировой подложке 19 МПа. Напряжения такой величины в слое кремния свидетельствуют о превышении предела текучести кремния, что приводит к зарождению дислокаций несоответствия.

3. Экспериментально исследован сплав, состоящий из 72 % серебра и 28 % меди, и определены его прочностные характеристики: $E = 88$ ГПа, предел прочности $\sigma_b = 372$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 230$ МПа.

4. Разработана методика расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре «кремний на сапфире». Методика реализована в виде авторской программы на языке С#. Рассчитано 200 вариантов, получено 27 Парето оптимальных, выбран 1 со следующими параметрами качества: максимальное эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{экв макс}} = 841,4$ МПа, нелинейность выходной характеристики 0,135 %, рабочий коэффициент передачи 6,9 мВ/В.

5. Создана пробная партия датчиков и проведено их экспериментальное исследование. Среднее значение выходного сигнала по партии новых датчиков составило 208,5 мВ, по партии серийно-выпускаемых датчиков составило 145 мВ. Средняя величина нелинейности выходного сигнала по партии новых датчиков 0,132 %, по партии серийно-выпускаемых датчиков 0,361 %. Использование оптимизированного чувствительного элемента позволит предприятию получить финансовую выгоду $\approx 850\,000$ рублей в год.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме настоящего исследования были опубликованы следующие работы:

1. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Численное моделирование тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Машиностроение и инженерное образование. 2017. №3(52). С. 56-63. (**журнал перечня ВАК**);
2. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A. Evaluation of output signal nonlinearity for semiconductor strain gauge // Solid State Phenomena. November 2017. Volume 269. P.60-70. (**Scopus Index**);
3. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A., Skvortsov A.A. Optimization of semiconductor pressure transducer with sensitive element based on “silicon on sapphire” structure // Periodico Tche Quimica. 2018. - Vol. 15, Issue 30. - С. 678 – 686. (**Scopus Index**);

4. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Многокритериальная оптимизация упругого элемента двухмембранного тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Приводы и компоненты машин. 2018. №3-4. С.27-30. (**журнал перечня ВАК**);
5. Gavryushin S.S., Skvortsov P.A. Skvortsov A.A. Numerical modeling and optimization of the design of the corrugated pressure sensor membrane // Periodico Tche Quimica. 15. Special issue (1). P. 174-181. (**Scopus Index**);
6. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Оптимизация упругого элемента двухмембранного тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Цифровые средства производства инженерного анализа» (ТПГУ, Тула 27 ноября – 1 декабря 2017 г.). С.41-48.
7. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Моделирование двухмембранного преобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» // Материалы XXII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятичи, 15–19 февраля 2016 г.): тезисы докладов. 2016. С. 80–81.
8. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Расчет упругого элемента тензодатчика на структуре кремний на сапфире (КНС) // Автоматизация и управление в машиностроении. – М., МГТУ «СТАНКИН». 2016. №1. С.52-56.
9. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Оптимизация конструкции полупроводникового тензопреобразователя давления на структуре «кремний на сапфире» (КНС) Материалы XXIV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова (Вятичи, 19–23 марта 2018 г.): тезисы докладов. 2018. С. 77–78.
10. Гаврюшин С.С., Скворцов П.А. Исследование напряженного-деформированного состояния чувствительного элемента полупроводникового датчика давления, выполненного на структуре «кремний на сапфире» // Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов (2-5 октября 2017г.): тезисы докладов. С.62.

Работа выполнена в рамках грантов:

1. РФФИ №16-07-01206 «Разработка нового подхода в анализе напряженно деформированного состояния структур кремний на сапфире методами гиперспектральной голографии».
2. РФФИ №14-07-00869 «Перспективные технологические процессы анализа тепловых явлений в системах металлизации полупроводниковых структур и керамик».
3. РФФИ №18-19-00450 «Гиперспектральная голография биообъектов в некогерентном свете».