

На правах рукописи

УДК 531.787.8

УШКОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДАВЛЕНИЯ С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ПЕРЕГРУЗКАМ**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва, 2008

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана и во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики им. Н.Л. Духова

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Рябов Владимир Тимофеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Слепцов Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент
Рубцов Иван Николаевич

Ведущая организация: НПК «Технологический центр» МИЭТ

Защита состоится « 5 » июня 2008 г. на заседании диссертационного совета Д212.141.18 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

Телефон для справок: (495) 267-09-63

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью учреждения, просим направить по указанному адресу.

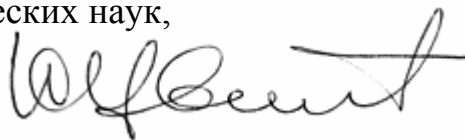
Автореферат разослан « 30 » апреля 2008 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

доктор технических наук,

доцент



Цветков Юрий Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Давление входит в качестве одной из переменных величин в описание явлений, связанных с поведением жидких или газообразных сред. Данные о давлении сжатого воздуха, газа, пара, масла или других жидкостей определяют надлежащее функционирование машин и механизмов. Первичным звеном микроэлектронных систем контроля и управления технологическими процессами, поставляющим данные о давлении рабочей среды, являются датчики давления с электрическим выходным сигналом. К таким датчикам предъявляются жёсткие требования: высокая точность, долговременная стабильность, миниатюрность, механическая прочность, надёжность, возможность сопряжения с микроэлектронными преобразователями сигналов, большинство из которых определяется параметрами первичного преобразователя давления – сердца датчика. В наибольшей степени эти показатели характерны для кремниевых чувствительных элементов (ЧЭ), создаваемых на основе технологии микроэлектроники. При изготовлении ЧЭ из монокристаллического кремния удаётся получить уникальные параметры изделий. В их число входят конструктивная и технологическая простота, малые габариты и масса, высокая прочность, идеальная упругая характеристика, большой срок службы, стабильность электрофизических характеристик в течение длительного времени, высокие пьезорезистивные свойства кремния.

Большой вклад в развитие теории и технологии полупроводниковых преобразователей давления внесён советскими и российскими учёными Осадчим Е.П., Чистяковым Ю.Д., Вагановым В.И., Олеском А.С., Гридчиным В.А., Стучебниковым В.М., Чаплыгиным Ю.А., Лучининым В.В., Мальцевым П.П. и другими.

Несмотря на большое количество работ, посвящённых исследованиям первичных преобразователей давления, ряд вопросов остаётся невыясненным. Это, прежде всего, касается разработки технологий защиты чувствительных элементов от разрушения при воздействии перегрузок; выявления конструктивно-технологических факторов, влияющих на их нагрузочную способность и метрологические характеристики; исследования способов увеличения чувствительности первичных тензопреобразователей при измерении малых давлений. Не до конца изучены технологические вопросы формирования

кремниевых мембран с концентраторами напряжений для создания приборного ряда преобразователей. Известные методы угловой компенсации не позволяют получать сверхтонкие мембраны с прямоугольной конфигурацией жёсткого центра (ЖЦ).

Целью работы является разработка, теоретическое и экспериментальное обоснование конструктивно-технологических методов производства параметрического ряда кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной стойкостью к перегрузкам.

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

1. Исследовать конструктивные и технологические факторы, влияющие на нагрузочную способность кремниевых мембран.
2. Разработать научные основы проектирования и изготовления чувствительных элементов давления со встроенной защитой от разрушения при воздействии перегрузок.
3. Исследовать технологические причины возникновения нелинейности преобразовательной характеристики чувствительного элемента и выявить пути их устранения.
4. Исследовать и реализовать конструктивно-технологические способы повышения чувствительности первичных преобразователей для измерения малых давлений.
5. Разработать технологические приёмы и методику защиты внешних углов концентраторов напряжений при изготовлении кремниевых мембран в широком диапазоне толщин.

Методы исследований

Теоретические исследования проводились на основе теории пьезорезистивного эффекта в полупроводниках, сопротивления материалов, математического анализа. Экспериментальные исследования осуществлялись на специализированных стендах с использованием прецизионных средств измерений, обработка результатов велась с помощью теории вероятностей и математической статистики.

В ходе исследований применялись расчёты напряжённо-деформированного состояния кремниевых кристаллов с использованием компьютерных программных пакетов. Регистрация процесса анизотропного травления осуществлялась с применением современной цифровой фототехники.

Научная новизна

1. Установлена взаимосвязь нагрузочной способности мембраны чувствительного элемента с величиной стопорного углубления, позволяющая рассчитать номинальный размер углубления и технологические допуски на него.
2. Аналитически установлено и экспериментально на модели и натуральных образцах чувствительных элементов подтверждено, что технологический подтрав жёсткого центра приводит к асимметрии чувствительности тензорезисторов и является основной причиной нелинейности преобразовательной характеристики ЧЭ.
3. Разработана методика многоступенчатой защиты внешних углов концентраторов напряжений, позволяющая изготавливать кремниевые мембраны в широком диапазоне отношений ширины их рабочей области к толщине.

Практическая ценность работы

1. Разработаны конструктивно-технологические методы производства кремниевых чувствительных элементов со встроенной защитой от разрушения при перегрузках на давления от сотен паскалей до десятков и сотен мегапаскалей.
2. Получены зависимости, позволяющие минимизировать нелинейность преобразовательной характеристики тензопреобразователя на этапах проектирования и разработки технологии его изготовления.
3. Разработаны и практически реализованы методика и технология многоступенчатой защиты внешних углов при анизотропном травлении кремния на глубину до 450 мкм и более.

Реализация результатов

Результаты, полученные в данной работе, использованы при разработке приборного ряда датчиков давления нового поколения во ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова (г. Москва). Получен акт о внедрении.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Технология изготовления и методика проектирования параметрического ряда кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной стойкостью к перегрузкам.
2. Конструктивно-технологические методы производства тензопреобразователей для измерения давлений в диапазонах, в десятки раз превышающих номинальный.

3. Методика расчёта нелинейности преобразовательной характеристики ЧЭ, позволяющая минимизировать погрешность нелинейности на стадиях проектирования первичного тензопреобразователя и разработки технологии его изготовления.
4. Методика и технология многоступенчатой защиты внешних углов концентраторов напряжений для производства кремниевых мембран в широком диапазоне отношений ширины их рабочей области к толщине.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры МТ-11 “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана, на научно-технической конференции молодых учёных “ВНИИА 2006” (ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва, октябрь 2006), на 5-й и 6-й научно-технических конференциях “Молодёжь в науке” (РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров, ноябрь 2006, ноябрь 2007).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 10 печатных работах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, библиографического списка использованной литературы из 124 наименований и изложена на 160 страницах машинописного текста, включает 47 рисунков и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определена цель и поставлены задачи работы, сформулированы научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы данные из литературных и патентных источников, касающиеся вопросов разработки и технологии изготовления первичных преобразователей давления в электрический сигнал. Представлен обзор основных способов преобразования, реализованных к настоящему времени с помощью методов микроэлектроники: ёмкостного, вибрационно-частотного и тензорезистивного. Для тензорезистивных ЧЭ отражены этапы их развития, особое внимание уделено современному состоянию разработок в области технологий защиты от разрушения при воздействии перегрузок и измерения

малых давлений. Установлено, что в большинстве датчиков абсолютного и избыточного давления защита ЧЭ от перегрузок, как правило, не предусмотрена, а противоперегрузочные устройства, применяемые в датчиках разности давлений, обладают рядом недостатков. Кроме того, анализ конструктивно-технологических решений в области измерения малых давлений показал, что современные датчики с верхним пределом измерений 100...6300 Па характеризуются существенной материало- и трудоёмкостью изготовления, низкой технологичностью производства. В связи с этим разработка кремниевого ЧЭ с повышенной стойкостью к перегрузкам, в том числе для измерения давлений менее 6,3 кПа, позволит улучшить точностные и эксплуатационные характеристики, упростить конструкцию и технологию изготовления датчиков давления, снизить себестоимость их изготовления.

Установлено, что до конца не решена задача расчёта составляющих погрешности нелинейности чувствительного элемента с прямоугольной мембраной. Получение соответствующих аналитических зависимостей, а также исследование влияния различных технологических факторов, в частности степени подтравка жёсткого центра, на линейность преобразовательной характеристики, позволит минимизировать указанную погрешность на стадиях разработки конструкции и технологии изготовления ЧЭ.

Представлено современное состояние технологий микропрофилирования кремния для получения мембран первичных тензопреобразователей различной конфигурации и толщины. Проанализированы известные способы защиты выпуклых углов от подтравливания при анизотропном травлении. Выявлено, что накопленные к настоящему времени данные не позволяют получать сверхтонкие мембраны с прямоугольной конфигурацией жёсткого центра.

Вторая глава посвящена исследованию нагрузочной способности кремниевых мембран и разработке чувствительного элемента с повышенной стойкостью к перегрузкам. Исследования макетов тензомодулей с ограничителем рабочего хода мембраны показали, что введение в конструкцию ЧЭ упора позволяет повысить стойкость мембраны к перегрузкам до 150...170 раз по отношению к номинальному давлению. Разработан ЧЭ с защитой от перегрузок (рис. 1), в котором ограничение прогиба мембраны реализовано посредством стопорного углубления в основании либо за счёт утонения жёсткого центра. Представлены технологические методы формирования таких углублений. Показано, что по сравнению с микропрофилированием стекла

способ получения стопорного углубления в кремниевом кристалле методом плазмохимического травления технологически более прост и эффективен и позволяет добиться большего процента выхода годных без ухудшения характеристик тензопреобразователей.

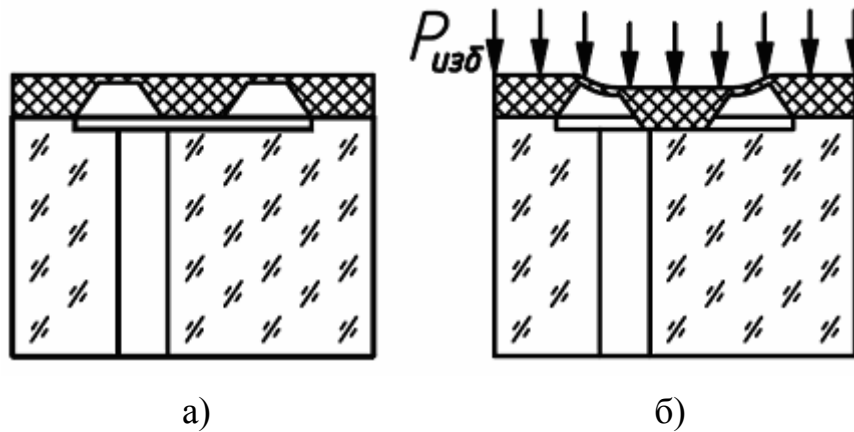


Рис. 1. Чувствительный элемент давления с защитой от перегрузок (а)
и принцип работы упора (б)

Вместе с тем, при сборке чувствительных элементов на малые давления посредством электростатического соединения выявлены случаи сращивания жёсткого центра со стеклянным основанием. Аналитическим путём установлено, что под воздействием прикладываемой разности потенциалов, мембрана ЧЭ прогибается на величину, сопоставимую с размерами стопорного углубления, и, благодаря низкой шероховатости поверхностей ЖЦ и стеклянного основания, между ними возникает неразъёмное соединение. Для устранения взаимодействия ЖЦ и основания при анодной посадке разработаны технологические приёмы для искусственного увеличения шероховатости стекла в области контакта с жёстким центром и даны рекомендации по оптимизации конструкции и технологического процесса производства таких ЧЭ.

Представлены методы исследования и моделирования характеристик ЧЭ, описана экспериментальная установка и оборудование, использованные в ходе исследований. На основе экспериментальных данных и компьютерного моделирования установлено, что стойкость мембраны к перегрузкам при использовании ограничителя прогиба увеличивается до 80...200 раз по отношению к номинальному давлению. Вместе с тем, по мере увеличения степени технологического подтравки ЖЦ наблюдается снижение номинального давления кристалла и его нагрузочной способности как с использованием

упора-ограничителя прогиба, так и без него. Наибольшей стойкостью к перегрузкам обладают чувствительные элементы с прямоугольной конфигурацией жёсткого центра, наименьшей – ЧЭ с жёстким центром, у которого отсутствуют грани в плоскостях $\{111\}$. Нагрузочная способность последних примерно в 1,5...2 раза меньше по сравнению с кристаллами с формой ЖЦ, близкой к прямоугольной. Изменение начального выходного напряжения после воздействия перегрузки у тензопреобразователей с упором не превышает 0,1...0,25 %, и они сохраняют работоспособность в различных климатических условиях в диапазоне температур $-60...+80$ °С, что подтверждено результатами соответствующих исследований. Также установлено, что ЧЭ с сильно подтравленным жёстким центром обладают чувствительностью к давлению после срабатывания защиты (рис. 2).

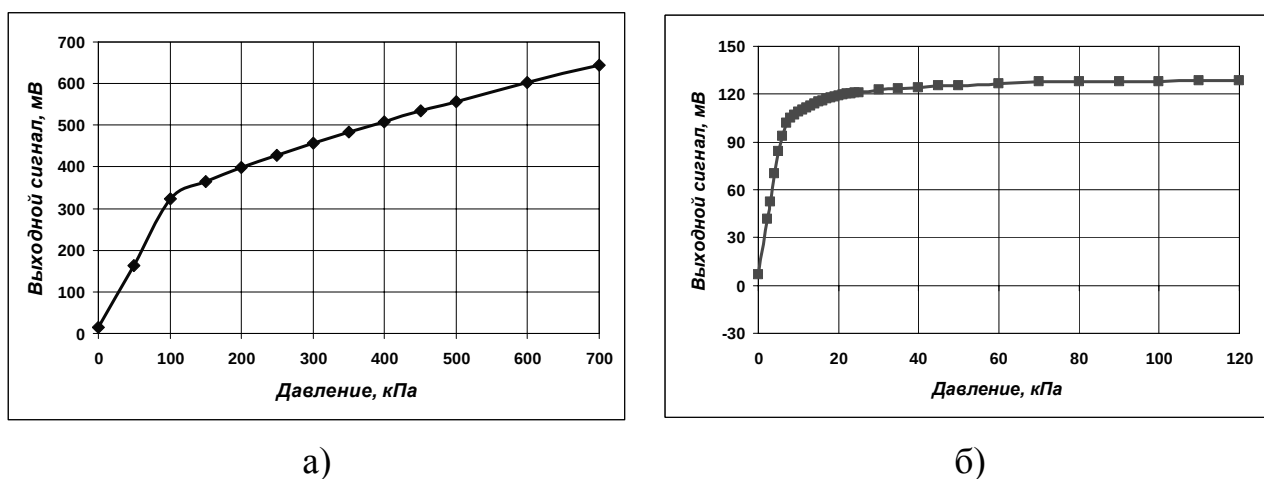


Рис. 2. Преобразовательные характеристики чувствительных элементов с упором: а – с подтравленным жёстким центром; б – с жёстким центром прямоугольной формы

Показано, что для ЧЭ с упором зависимость между предельным давлением, приводящим к разрушению кристалла, и величиной стопорного углубления носит линейный характер. Нагрузочная способность таких ЧЭ снижается по мере увеличения размера стопорного углубления. Наибольшее давление выдерживают кристаллы с упором-ограничителем прогиба, у которых зазор между поверхностями жёсткого центра и основания равен нулю, а наименьшее давление соответствует кристаллам без упора. Последние условно можно считать эквивалентными ЧЭ с упором с величиной стопорного углубления, равной предельному прогибу мембраны ЧЭ без защитного упора.

Предложена методика, позволяющая задавшись давлением срабатывания защиты, размерами ЖЦ и плоской части мембраны рассчитать величину стопорного углубления (рис. 3) и назначить технологические допуски на него

$$\delta_n = \frac{[p_2] - [p_n]}{[p_2] - [p_1]} \cdot [\delta], \quad (1)$$

где $[p_1]$, $[p_n]$, $[p_2]$ – предельные давления разрушения мембраны ЧЭ без ограничителя прогиба, со стопорным углублением величиной δ_n и с “нулевым” зазором между ЖЦ и основанием соответственно;

$[\delta]$ – предельная величина стопорного углубления, соответствующая наибольшему прогибу мембраны ЧЭ без упора.

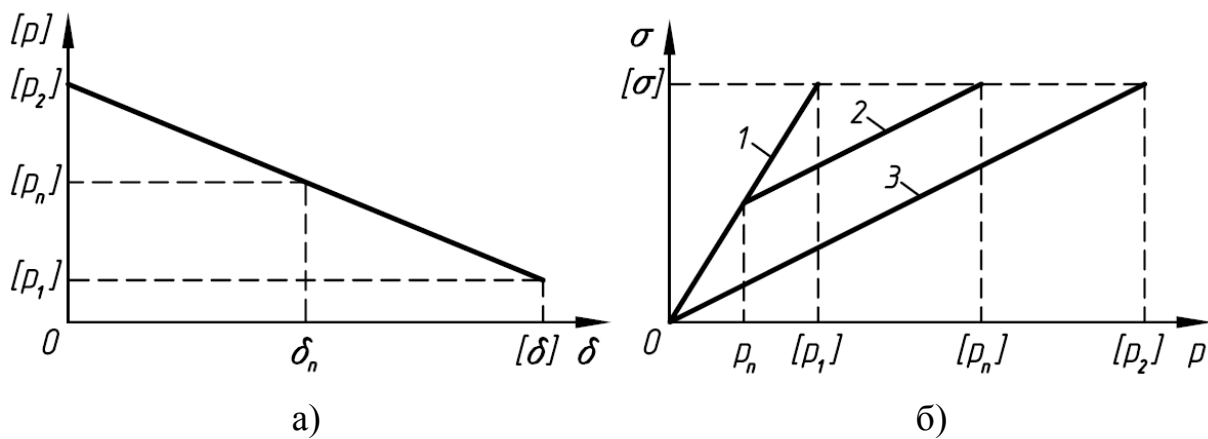


Рис. 3. Иллюстрация к расчёту величины стопорного углубления:

- а – зависимость предельного давления ЧЭ от величины стопорного углубления;
- б – зависимость напряжений в мембране ЧЭ от приложенного к ней давления;
- 1 – ЧЭ без упора; 2 – ЧЭ с упором; 3 – ЧЭ с “нулевым” зазором между жёстким центром и основанием

Опираясь на экспериментальные данные и результаты моделирования, даны рекомендации по выбору оптимальной величины стопорного углубления для получения наилучшего сочетания параметров чувствительного элемента и обеспечения его безотказной работы в выбранном рабочем интервале давлений и широком диапазоне температур. Для исключения возможности срабатывания защиты до достижения номинального давления размер стопорного углубления должен не менее чем в 1,5...2 раза превышать прогиб мембраны под воздействием номинальной нагрузки. Для тензопреобразователей,

применяемых в датчиках давления с перестраиваемыми диапазонами оптимальный размер стопорного углубления составляет 10...15 мкм.

Следует отметить, что принцип ограничения хода мембраны для повышения её нагрузочной способности может быть распространён и на чувствительные элементы с плоской мембраной.

Третья глава посвящена исследованию причин возникновения погрешности нелинейности преобразовательной характеристики чувствительных элементов с мембранами различной конфигурации. Аналитически установлено и экспериментально на модели и натурных образцах подтверждено, что нелинейность обусловлена разной чувствительностью резисторов в плечах тензомоста. Для расчёта максимального значения нелинейности в заданном диапазоне давлений получена зависимость:

$$\text{Max}(\gamma_{\text{нел}}) = \frac{k_{11} - k_{21}}{8 + 4k_{21} - 4k_{11}}, \quad (2)$$

где $k_{11} = \frac{\Delta R_+}{R_o}$, $k_{21} = \frac{\Delta R_-}{R_o}$ – относительное изменение сопротивлений

тензорезисторов, работающих на растяжение и сжатие соответственно;

R_o – номинальное сопротивление тензорезисторов в мосте.

У тензопреобразователей с жёстким центром основной причиной различий в чувствительности тензорезисторов и, как следствие, снижения номинального давления, является подтрав ЖЦ, обусловленный несовершенством технологического процесса формирования кремниевых мембран. Подтрав вызывает перераспределение напряжений в мембране, что в свою очередь приводит к смещению областей максимальных напряжений относительно положения тензорезисторов (рис. 4). У кристаллов с сильно подтравленным жёстким центром напряжения у границ мембраны по абсолютной величине почти на порядок превышают напряжения у границ жёсткого центра. В связи с этим чувствительные элементы с формой ЖЦ, близкой к прямоугольной, демонстрируют незначительную нелинейность характеристики в рабочем диапазоне (0,1...0,2 %), а у кристаллов с сильно подтравленным ЖЦ, у которого отсутствуют грани в плоскостях {111}, нелинейность может достигать нескольких процентов. Для получения тензопреобразователей с нелинейностью не более 0,2...0,4 % и минимальных потерь

в чувствительности необходимо, чтобы размер неподтравленной области жёсткого центра составлял не менее $1,0 \dots 1,2$ длины тензорезистора.

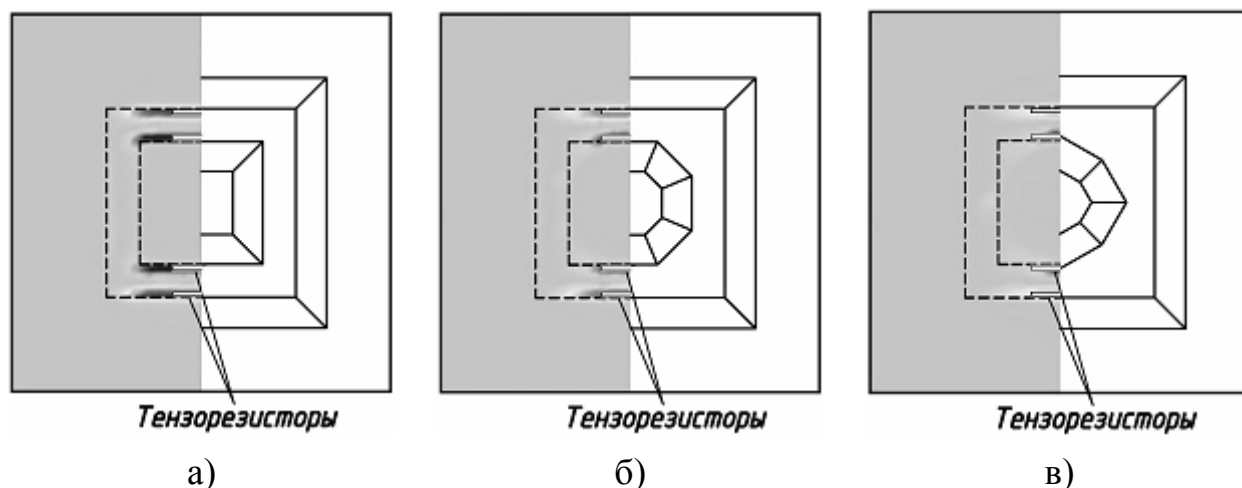


Рис. 4. Распределение напряжений в кристалле чувствительного элемента при приложении давления 40 кПа для трёх конфигураций жёсткого центра: а – правильной формы; б – немного подтравленного; в – сильно подтравленного

Показано, что кристаллы с сильно подтравленным жёстким центром благодаря различиям в чувствительности тензорезисторов могут использоваться для измерения давлений, существенно превышающих номинальное. ЧЭ с конфигурацией жёсткого центра, близкой к прямоугольной, также могут применяться для измерения давлений за пределами номинального диапазона, если в их топологию ввести дополнительный тензомост. При этом у последних не будет потерь в нагрузочной способности по сравнению с тензопреобразователями, имеющими технологический подтрав ЖЦ.

Исследования, проведённые во 2 и 3 главах, дополнительно обосновывают необходимость поисковых работ в области технологий защиты выпуклых углов при формировании кремниевых мембран с концентраторами напряжений.

В четвёртой главе рассмотрены вопросы проектирования тензопреобразователей для измерения малых давлений в диапазонах от $0 \dots 0,1$ до $0 \dots 6,3$ кПа. Установлено, что локальное утонение мембраны с планарной стороны ЧЭ позволяет до $1,5 \dots 2$ раз повысить чувствительность кристалла по сравнению с кристаллом обычной формы. Показано, что из-за особенностей технологии сборки датчиков давления ЧЭ, рассчитанный на измерение давлений менее 6,3 кПа, должен быть устойчив к перегрузке со стороны тен-

зосхемы более 100 кПа. Кристаллы с плоской мембраной не удовлетворяют данному требованию. С учётом результатов, полученных во второй главе диссертации, предложены и промоделированы различные варианты конструктивного исполнения ЧЭ на малые давления с ограничителем прогиба мембраны, в том числе с применением дополнительных концентраторов напряжений. Исходя из имеющихся технологических возможностей (основное требование – минимальное отклонение от базового технологического маршрута) и требований по стойкости к воздействию перегрузок для реализации выбрана конструкция ЧЭ с центральным выступом и поверхностно-структурированной мембраной (рис. 5). Такой ЧЭ имеет встроенную защиту от разрушения при перегрузках – ограничитель прогиба, выполненный за счёт кремниевого кристалла.

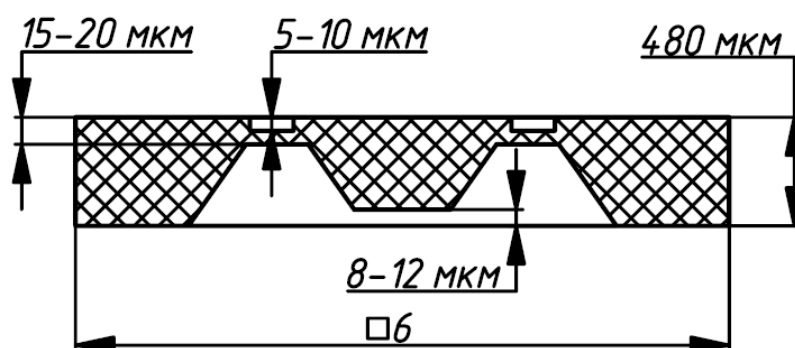


Рис. 5. Поперечное сечение кристалла ЧЭ с поверхностно-структурированной мембраной с жёстким центром

Опытные образцы тензомодулей с поверхностно-структурированной мембраной обладают чувствительностью 3...5 мВ/(кПа·В), что хорошо согласуется расчётными значениями. Показано, что такие ЧЭ пригодны для создания датчиков с верхним пределом измерений до 100...250 Па на базе существующих гидроблоков на стандартные диапазоны преобразования без существенных изменений их конструкции и технологии изготовления. Представлены результаты исследования точностных характеристик датчиков разности давлений, изготовленных с применением таких тензомодулей.

Благодаря введению в конструкцию ЧЭ упора, кристалл, рассчитанный на измерение давлений 1,0...6,3 кПа и менее, выдерживает перегрузки до 1 МПа. Установлено, что нагрузочная способность чувствительного элемента с упором-ограничителем прогиба и поверхностно-структурированной мембраной в 1,5...2 раза меньше аналогичного значения для ЧЭ без локального утонения мембраны.

Пятая глава посвящена исследованию механизмов подтравливания внешних углов мезаструктур, получаемых при анизотропном травлении кремния в водном растворе едкого кали. Целью проведения экспериментальных исследований была проверка накопленных ранее и получение недостающих данных для разработки технологии и комплексной методики защиты выпуклых углов для изготовления мембран толщиной до 5...15 мкм с жёстким центром. Эксперименты проводились при постоянной концентрации травильного раствора 33 % при температурах +70, +75, +80, +85 и +90 °С для двух типоразмеров мембран с ЖЦ, применяемых в кристаллах размерами 4х4 мм² и 6х6 мм². Толщины мембран выбирались в диапазоне от 20 до 250 мкм на основании конструкторской документации на чувствительный элемент. Для экспериментальных исследований были отобраны три варианта фигур упреждения (рис. 6): в форме квадрата, полосы и диагональной формы.

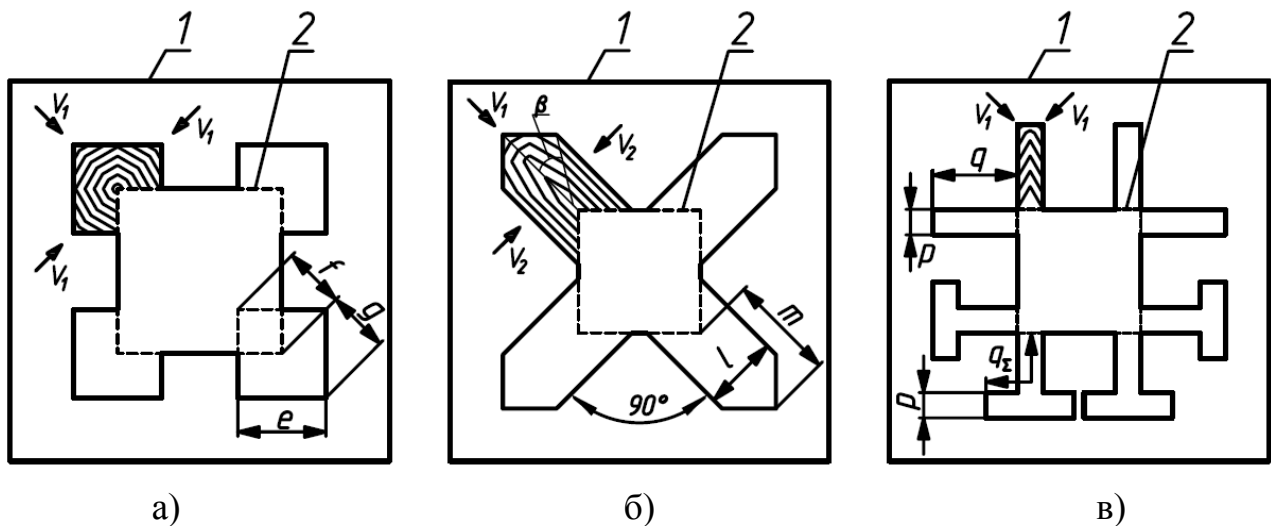


Рис. 6. Варианты исполнения и механизм травления компенсационных элементов: а – форма квадрата; б – форма полосы; в – диагональная форма; 1 – внешний контур мембраны ЧЭ на фотошаблоне; 2 – контур жёсткого центра

Во время экспериментов фиксировались скорости травления в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, скорости и направления подтравки компенсационных фигур (рис. 6, 7). Скорость травления в направлении $\langle 100 \rangle$ рассчитывалась на основании данных об исходной толщине пластины и глубине вытравливаемого углубления в заданный промежуток времени. Определение скоростей травления компенсирующих элементов производилось по измерениям перемещения следов плоскостей по поверхности пластины с учётом

углов, образуемых ими с плоскостью пластины. Значения, полученные для скоростей травления в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, хорошо согласуются с данными из литературы.

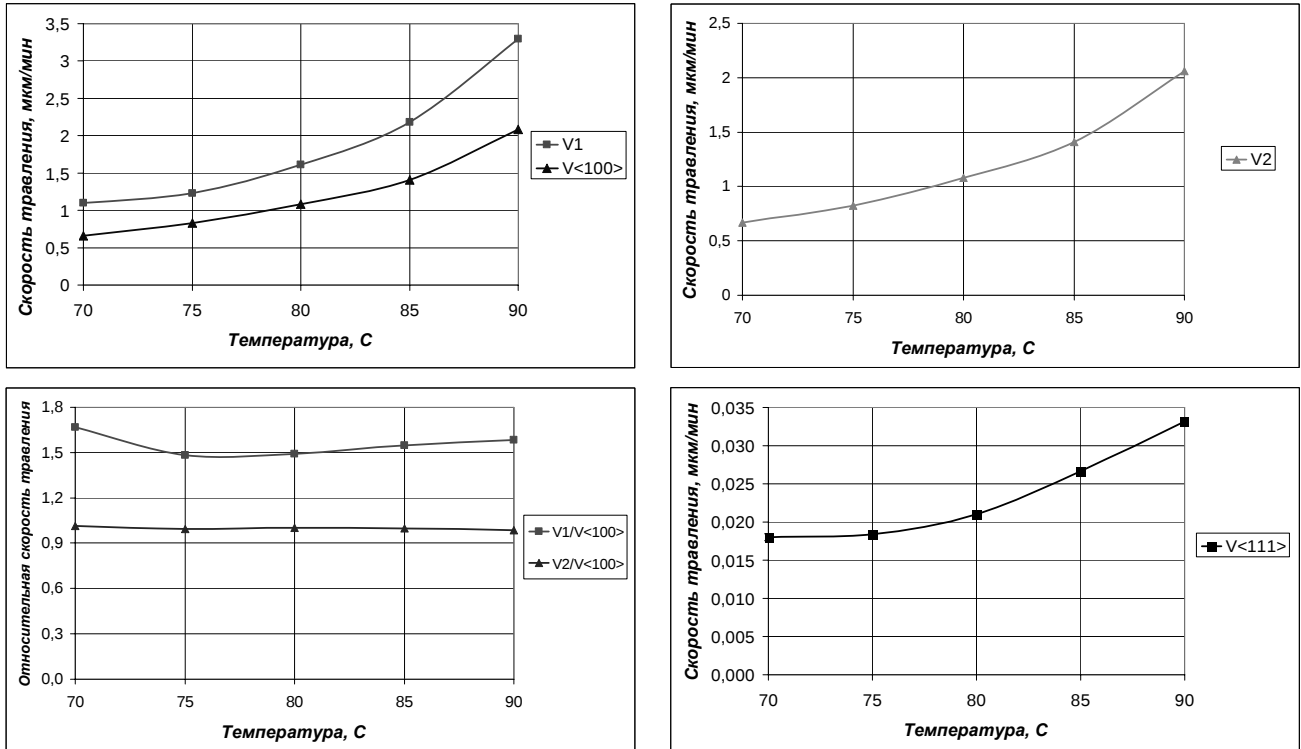


Рис. 7. Зависимость скоростей травления от температуры травителя

На основе полученных в ходе экспериментов данных разработана методика для расчёта размеров всех трёх типов компенсаторов для кремния n -типа проводимости. Размеры компенсаторов в форме квадрата назначаются по формуле

$$f = g = \frac{e}{\sqrt{2}} = \frac{V_1}{V_{\langle 100 \rangle}} \cdot h_{mp}, \quad (3)$$

где h_{mp} – глубина травления.

Размеры диагонального компенсатора определяются уравнениями

$$l = 2 \cdot h_{mp} = 2 \cdot V_{\langle 100 \rangle} \cdot t_{mp}, \quad (4)$$

$$m \geq h_{mp} (1 + \operatorname{ctg} \beta), \quad (5)$$

где β – угол, образуемый линией пересечения фронтов травления компенсатора с направлением вектора скорости V_1 (см. рис. 6).

Для компенсатора в форме полоски вначале задаётся ширина полоски p , которая должна быть не менее 80...100 мкм, а затем рассчитывается размер q

$$q = 1,673 \cdot h_{mp} \cdot \frac{V_1}{V_{<100>}} - \gamma \cdot p. \quad (6)$$

Коэффициент γ равен 0,25 для компенсатора простой формы и 1,75 для Т-образного компенсатора.

Установлено, что жёсткий центр с прямоугольными гранями получается при использовании упреждающих фигур диагональной формы. Однако такие компенсаторы можно применять для изготовления ЧЭ с размерами мембраны $a \geq 4,24 \cdot h_{mp}$ и жёсткого центра $b \geq 5,94 \cdot h_{mp}$. Для формирования мембран с размерами $3,72 \cdot h_{mp} \leq a \leq 4,24 \cdot h_{mp}$ и $3,33 \cdot h_{mp} \leq b \leq 5,94 \cdot h_{mp}$ следует использовать компенсаторы квадратной формы или в форме полоски. В случае, когда $a < 3,72 \cdot h_{mp}$ и (или) $b < 3,33 \cdot h_{mp}$, не всегда возможно осуществить полную защиту угла из-за ограничений, накладываемых на размеры компенсаторов внешними границами контура мембраны (рис. 6). Для выхода из такой ситуации предложено использовать комбинацию двух типов компенсаторов, например квадратной формы и в форме полоски. Применяя многоступенчатую компенсацию из нескольких типов упреждающих фигур, можно получать мембраны толщиной до 20 мкм и менее с конфигурацией жёсткого центра, близкой к прямоугольной. Достоверность разработанной методики подтверждена экспериментально.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Одним из недостатков первичных тензопреобразователей давления является их низкая стойкость к перегрузкам, особенно динамическим, а также маленькая чувствительность при измерении малых давлений. Для получения ЧЭ с повышенной нагрузочной способностью и возможностью измерять давления, до 80...200 раз превышающие номинальное, необходимо применять упоры-ограничители прогиба мембраны.
2. Для проектирования и производства ЧЭ со встроенной защитой от перегрузок рекомендуется использовать методику расчёта размеров и технологических допусков на стопорное углубление на основании заранее выбранных размеров мембраны и давления срабатывания защиты,

- а также технологические приёмы формирования стопорных углублений, позволяющие получить наилучшее сочетание параметров тензомодуля.
3. Одной из причин возникновения нелинейности, снижения чувствительности и нагрузочной способности тензопреобразователей является технологический подтрав жёсткого центра. Для получения ЧЭ с нелинейностью не более 0,2...0,4 %, минимальных потерь в чувствительности и стойкости к перегрузкам размер неподтравленной области ЖЦ должен быть не менее 1,0...1,2 длины тензорезистора.
 4. Нелинейность преобразовательной характеристики ЧЭ пропорциональна разности относительных чувствительностей резисторов в плечах тензомоста. Для расчёта составляющих нелинейности, вызываемых технологическими и конструктивными факторами, следует использовать предлагаемые аналитические зависимости.
 5. Для производства ЧЭ с концентраторами напряжений прямоугольной формы рекомендуется использовать методику и технологию многоступенчатой защиты выпуклых углов, основанные на введении в рисунок фотошаблона упреждающих фигур и позволяющие изготавливать кристаллы в широком диапазоне толщин мембран (10...300 мкм).
 6. Для получения в рамках единого конструктивно-технологического решения кристаллов с чувствительностью не менее 5...8 мВ/(В·кПа) для датчиков с верхним пределом измерений 100...6300 Па следует в конструкцию ЧЭ вводить дополнительные концентраторы напряжений с планарной стороны мембраны.
 7. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при разработке и производстве ЧЭ, основанных на иных способах преобразования, в частности вибрационно-частотном и ёмкостном.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Ушков А.В. Моделирование фотолитографии при изготовлении изделий микромеханики // Студенческая научная весна 2002: Сборник докладов студенческой научной конференции. – М., 2002. – С. 150-152.
2. Ушков А.В. Проектирование, изготовление и исследование тензомодулей датчиков давления на базе кремниевых чувствительных элементов // Вопросы атомной науки и техники. Ядерное приборостроение (М.). – 2004. – Вып. 1 (21). – С. 32-38.

3. Ушков А. В. Исследование характеристик, конструкции и технологии изготовления вибрационно-частотного первичного преобразователя давления // Вопросы атомной науки и техники. Ядерное приборостроение (М.). – ВНИИА, 2005. – Вып. 1 (22). – С. 46-52.
4. Ушков А.В. Разработка кремниевого чувствительного элемента давления с верхним пределом измерения менее 6,3 кПа // Сборник тезисов научно-технической конференции молодых учёных ВНИИА-2006. – М., 2006. – С. 40-41
5. Ушков А.В. Особенности формирования мембраны чувствительного элемента давления с жёстким центром в водном растворе КОН // Сборник тезисов научно-технической конференции молодых учёных ВНИИА-2006. – М., 2006. – С. 67-68
6. Ушков А.В., Козлов А.Н. Исследование путей увеличения перегрузочной способности кремниевых мембран и разработка чувствительного элемента давления со встроенной защитой от перегрузок // Молодёжь в науке: Сборник докладов V научно-технической конференции РФЯЦ ВНИИЭФ. – Саров, 2007. – С. 558-561
7. Ушков А.В., Козлов А.Н. Проектирование, изготовление и исследование кремниевых чувствительных элементов давления со встроенной защитой от перегрузок // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – №5. – С. 49-51.
8. Ушков А.В., Исакова Г.А., Рябов В.Т. Разработка методики компенсации выпуклых углов при формировании мембраны чувствительного элемента давления с жёстким центром в водном растворе КОН // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – №6. – С. 55-58.
9. Ушков А.В. Исследование возможностей создания кремниевых чувствительных элементов для измерения давлений менее 6,3 кПа // Вопросы атомной науки и техники. Ядерное приборостроение (М.). – 2007. – Вып. 1 (24). – С. 145-153.
10. Ушков А.В. Технология формирования кремниевых мембран с центральным выступом в водном растворе гидроксида калия // Вопросы атомной науки и техники. Ядерное приборостроение (М.). – 2007. – Вып. 1 (24). – С. 154-160.