

50-ЛЕТИЮ МИЭМ ПОСВЯЩАЕТСЯ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Прогресс современных инженерных и естественных наук на рубеже XX-го и XXI-го столетий привел к рождению новой научно-технической отрасли, получившей название «**нанотехнология**». По мнению ведущих экспертов и специалистов, XXI-й век будет веком нанотехнологий, которые и определяют его облик.

Практически любое техническое решение с использованием нанотехнологии является достаточно сложным сочетанием различных конструктивных подходов с учетом принципиально новых свойств материалов и элементов, появляющихся при переходе в наноразмерную область. Это требует решения инженерных задач, связанных с измерением параметров, привлечением новых технологических процессов и специального технологического оборудования, необходимости сочетания принципиально новых свойств отдельных компонентов и устройств. Во всех этих случаях речь идет о самостоятельном направлении под общим названием «**наноинженерия**», под которой можно понимать научно-практическую деятельность человека по конструированию, изготовлению и применению наноразмерных (наноструктурированных) объектов или структур, созданных методами нанотехнологий.

Термин «наноинженерия» связан с электронными приборами, системами и оборудованием. Это свидетельствует о появлении принципиально новых классов приборов, устройств и оборудования и об их достаточно широким внедрением в современную практику. Необходимо отметить, что микроэлектроника с переходом на проектные нормы $65\div45$ нм становится **наноэлектроникой**. Этот термин применяется в соответствии с определениями, предложенными в Российской Концепции

развития в области нанотехнологий и в Программе развития nanoиндустрии в стране до 2015 года.

Общим направлением nanoинженерии следует считать создание приборов, устройств и оборудования, в состав которых входят компоненты, конструктивные элементы, детали и другие составляющие, построенные на использовании наноструктурных материалов (нанокристаллов, тонких пленок, гетероструктур и др.) и реализующие принципиально новые свойства, обусловленные переходом в наноразмерную область.

Принципиальная особенность функциональных наносистем – необходимость решения проблем, связанных с сочетанием наноразмерных элементов и применением nanoинженерии.

Типичные примеры микро- и наносистемной техники – различные nanoустройства и, прежде всего, nano- и микроэлектромеханические системы. В наносистемную технику могут быть, в частности, встроены компоненты, разработанные с использованием квантоворазмерных эффектов электронного характера. При этом должны учитываться эффекты, определяющие механические, тепловые, химические свойства не только самих компонентов, но и инженерной системы в целом. В этом случае nanoинженерия в качестве самостоятельно направления должна базироваться на специфических подходах, связанных как с необходимостью конструктивного сочетания компонентов, так и с потребностью в разработке новых методов расчета, конструирования и моделирования.

Учитывая комплексный характер Программы развития nanoиндустрии, с учетом целей стандартизации раздел «Nanoинженерия» включает:

1. Микро- и наносистемную технику, nanoоптику, наносенсоры;
2. Интерфейсы и транспорты наносистем;

3. Технологию и оборудование для формирования наноструктур;
4. Комплекс методов контроля и анализа наносистем – метрологическое обеспечение, микроскопию, испытания, сертификацию;
5. Наноинженерию в приборо- и машиностроении, в том числе, в электронном машиностроении.

В свою очередь, современное электронное машиностроение, как подотрасль радиоэлектронной промышленности, является производственно-технической базой для реализации методов микро- и наноинженерии.

Предлагаемая серия книг охватывает наиболее важные научные и прикладные вопросы развития микро- и наноинженерии в электронном машиностроении, в том числе: наноинженерию туннельных преобразователей, наноинженерию углеродных структур, наноинженерию фуллеренов и нанотрубок, микроинженерию коммутационной аппаратуры, микро- и наноинженерию пьезоэлектрических приводов, микроинженерию магнитных устройств, микро- и наноинженерию электронно-лучевой оптики.

Авторы оставляют за собой право на изменение тематики и названий отдельных книг в рамках общего названия монографии – «Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении».

Авторы монографии выражают глубокую благодарность рецензентам: доктору технических наук и доктору философских наук, профессору, заведующему лабораторией Учреждения Российской академии наук Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН Виктору Аркадьевичу Глазунову и доктору технических наук, профессору, генеральному директору ООО «CALS-технологии» Александру Славовичу Шалумову за тщательный просмотр рукописей, проявленное внимание к рецензируемым книгам, а также за высказанные ценные замечания, которые способствовали улучшению содержания предлагаемых читателю изданий.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

За несколько десятков лет развития микроэлектромеханики было создано огромное количество разнообразных приборов, при этом основными их видами являются интегральные датчики и исполнительные механизмы (приводы). В последние десятилетия в данной области техники произошел значительный качественный скачок, связанный с появлением широкого спектра так называемых микроэлектромеханических систем (МЭМС) – полупроводниковых приборов, совмещающих на одном чипе электронную и механическую части, изготавливаемые в едином технологическом процессе. Современная измерительная МЭМС содержит на одном кристалле, как правило, несколько механических (чувствительных) элементов вместе со сложными электронными схемами управления, преобразования и обработки сигнала, выдающими на выходе информацию об измеряемой величине в цифровой форме.

В качестве перспективного направления развития таких устройств необходимо отметить так называемые НЭМС (НЭМС – «наноэлектромеханические системы»), о которых в настоящее время все чаще встречаются упоминания в литературе. Под НЭМС понимаются микросистемы, содержащие в себе элементы, либо сами по себе имеющие нанометровый размер, либо разнесенные друг от друга на расстояния того же порядка. Функционирование НЭМС основано на физических эффектах, наблюдаемых на этих расстояниях, таких, например, как действие атомных сил или туннелирование электронов. По этой причине туннельные интегральные преобразователи также относятся к классу НЭМС.

Следует отметить, что линейки оборудования, имеющиеся в распоряжении отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности, в которых нормы топологии создаваемых приборов составляют $1,5 \div 0,8$ мкм, соответствуют уровню 20÷30-ти летней давности.

Снятие этих линеек с эксплуатации и их замена более совершенным оборудованием – вопрос ближайшего будущего. Однако, выводимое из эксплуатации оборудование может быть успешно использовано при производстве микро- и наносистем, что открывает дополнительную возможность наиболее рационального его использования.

Из вышеизложенного следует, что задача разработки и оптимизации конструктивных и технологических решений, используемых при создании монолитных туннельных преобразователей, является актуальной и своевременной, так как эти решения позволяют значительно понизить себестоимость отечественных МЭМС и НЭМС и дать возможность производить их массовым тиражом.

В книге рассматриваются научно-технические задачи, связанные с разработкой интегральных упругих чувствительных элементов планарных туннельных преобразователей, а именно:

- Разработка конечноэлементных моделей напряженно-деформированного состояния упругих чувствительных элементов (УЧЭ) преобразователей, определяющих жесткостные свойства УЧЭ, а также математические модели, описывающие физические эффекты, характерные для «глубоко субмикронных» МЭМС или НЭМС.
- Разработка технологического маршрута изготовления УЧЭ монолитных туннельных преобразователей, основанного на операциях технологии КМОП, использующихся на отечественных предприятиях электронной промышленности.
- Отработка нестандартных операций технологии изготовления УЧЭ монолитных туннельных преобразователей на экспериментальных тестовых структурах, анализ получаемых структур с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ), анализ структурных и электрофизических характеристик

используемых электродных материалов на различных стадиях технологического процесса с использованием методик и аппаратуры сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), проверка работоспособности получаемых структур при помощи методов электрических измерений, использующихся в микроэлектронном производстве.

- Проведение комплекса экспериментальных исследований, направленных на определение упругих свойств полученных диафрагменных структур, с использованием интерференционных оптических методов.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами микро- и наноинженерии в электронном машиностроении, в том числе наноинженерией туннельных преобразователей.

Издание может быть также рекомендовано аспирантам ВУЗов и студентам, обучающимся по направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и наноэлектроника» профиля подготовки «Микро- и наноинженерия в электронике».

ГЛАВА 1. МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

1.1. Место технологий МЭМС и НЭМС в современном приборостроении

Технология МЭМС, позволяющая разрабатывать и производить широкий спектр полупроводниковых приборов, изготавливаемых по групповой кремниевой технологии и совмещающих в себе электронную и механическую части, интегрируя их на одном чипе [2÷6], ознаменовала собой значительный качественный скачок в развитии микромеханических устройств [1]. Основными видами таких устройств являются разнообразные интегральные преобразователи и исполнительные механизмы (приводы).

Производство таких устройств стало возможно благодаря развитию микроэлектроники. Новые технологии разработки и промышленного производства микроэлектромеханических систем являются развитием планарных технологических процессов, уже давно используемых при изготовлении интегральных схем.

В работе [6] отмечается, что в основе развития и практического применения технологий МЭМС лежат чисто экономические факторы. Известно, что массовое производство микросхем чрезвычайно дешево. В то же время классические промышленные технологии (механообработка,

литье, технология пластмасс и др.), используемые при изготовлении традиционных электромеханических устройств, характеризуются резким увеличением себестоимости производства по мере снижения линейных размеров (и роста точности изготовления) деталей механических систем. Этим и обусловлены попытки изготовления как отдельных деталей механической части, так и всего изделия в едином технологическом производственном процессе, что при массовом производстве сводит себестоимость всего электромеханического блока к весьма низким значениям. Кроме того, результирующее изделие получается функционально полным с микрометровыми размерами и минимальным энергопотреблением.

За рубежом существует множество фирм, разрабатывающих и серийно производящих подобные устройства. Большое число (более 400 еще в 1997 году) университетов и коммерческих компаний США и Японии, сконцентрировав усилия на развитии технологий МЭМС, открыли широчайший спектр их возможного применения [8]. Темпы роста мировых продаж изделий микромеханики интенсивно увеличиваются с каждым годом, что ставит эту область деятельности в один ряд с так называемыми "критическими" технологиями, определяющими уровень развития экономики. Объём мировых продаж МЭМС-изделий составлял на 1999 год 1/10 часть продаж изделий "традиционной" микроэлектроники, увеличившись по сравнению с 1995 годом более чем в два раза [7÷8]. Значительно вырос объем инвестиций в отрасль, которая еще относительно недавно существовала в основном на средства, выделяемые государством (в 1991 году в США они составили 3 млн. долл., в 1995 – около 35 млн., из которых почти 30 млн. долл. было отчислено DARPA) и высшими учебными заведениями. По данным IntelliSense (с 2000 года производственное и программное МЭМС-подразделение компании Corning), еще в конце 1990-х годов практически никаких инвестиций

венчурного капитала в эту отрасль не производилось. В 2000 году компании, разрабатывающие МЭМС-устройства, получили инвестиции в размере 500 млн. долл. В 2001 году объем венчурного капитала, вложенного в развитие МЭМС, превысил эту сумму уже в первое полугодие, а количество компаний, занимающихся разработкой и созданием микроэлектромеханических приборов, достигло 900. Эта технология привлекла внимание и таких крупнейших полупроводниковых производителей, как Analog Devices, Texas Instruments, Intel, Freescale, Lucent Technologies [9÷12]. В настоящее время ежегодно оформляется более 400 патентов в этой области, а новые изделия окупаются за полтора-два года. В настоящее время более 70 компаний-производителей технологического оборудования для электронной промышленности производят установки, специализированные именно для выпуска МЭМС.

К сегодняшнему дню разработано и создано огромное количество разнообразных микроэлектромеханических приборов и систем. Многие из них вышли на широкий рынок и производятся крупными тиражами. Это различного рода датчики, микронасосы, перестраиваемые лазерные резонаторы, волоконно-оптические переключатели, переменные конденсаторы, матрицы микрозеркал, СВЧ-устройства, матрицы мироконсольных теплоприемников или даже такие приборы, как миниатюрные газовые хроматографы или ДНК-анализаторы [1÷3, 9÷15]. К микроэлектромеханическим устройствам можно отнести также изготавливаемые методами кремниевой технологии головки для струйной печати [1], которые уже долгое время занимают на рынке одно из первых мест. Весьма продаваемыми в настоящее время МЭМС являются пространственно-временные световые модуляторы, изготовленные на базе матриц микрозеркал и используемые в современных телевизионных устройствах и мультимедиапроекторах. Основным изготовителем этих приборов является фирма Texas Instruments [11].

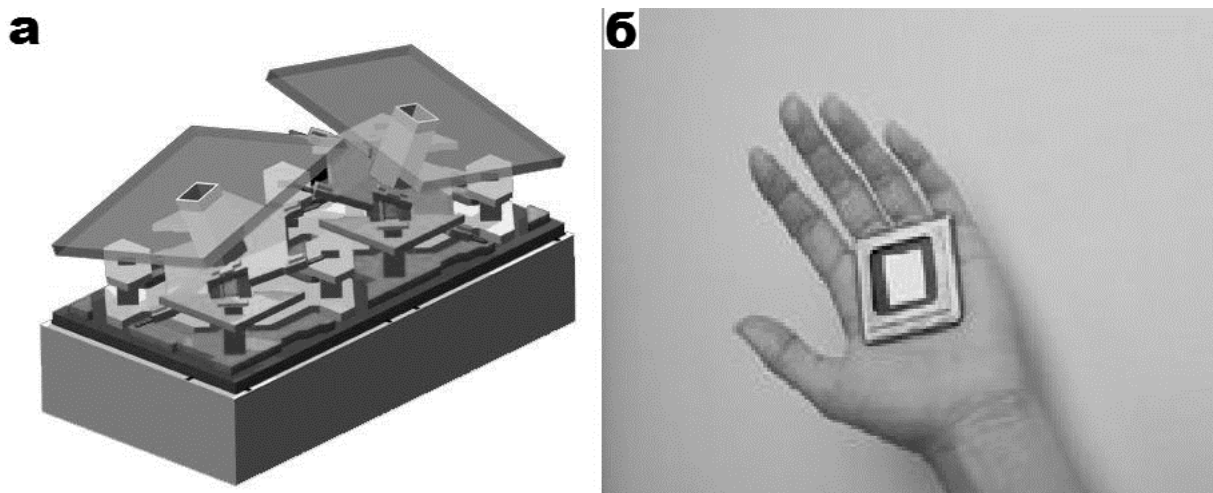


Рис. 1.1. Матричный микроэлектромеханический модулятор света фирмы Texas Instruments [11]:

а – фрагмент микрозеркальной матрицы;

б – общий вид устройства (матрица 1280x1024 пикселей)

На рис.1.1,а изображен фрагмент такой матрицы, состоящей из микроскопических зеркал (линейный размер одного зеркала – 13,6 мкм), обладающих высоким коэффициентом отражения. Каждое зеркало через подвижные пластины соединяется с основанием матрицы. Под противоположными углами зеркал размещены управляющие электроды. Под действием электрического поля зеркало принимает одно из двух положений, отличающихся на 20°. Матрица 1280×1024, содержащая 1310720 зеркал, имеет весьма небольшие размеры (рис.1.1,б).

Благодаря этим средствам удалось создать компактные (весом менее 3 кг) мультимедиапроекторы, обладающие повышенной световой мощностью (более 1000 ANSI Lm) по сравнению со своими аналогами, использующими жидкокристаллические световые модуляторы.

Весьма перспективными являются микроэлектромеханические волоконно-оптические коммутаторы, также использующие в своей конструкции микрозеркала, управляемые электрическим полем [12,15].

К числу лидеров по продажам среди МЭМС могут быть также отнесены разнообразные интегральные преобразователи, такие, как инерционные преобразователи (МЭМС-гироскопы и акселерометры) или датчики давления [3].

Использование полупроводниковых материалов и единство технологии позволяет создавать измерительные микросистемы, обладающие следующими преимуществами:

- чувствительность на 1-2 порядка выше, чем у сборных преобразователей, что позволяет существенно повысить точность и быстродействие приборов;
- миниатюрность, малое потребление энергии;
- возможность работы в широком диапазоне температур;
- низкая стоимость, благодаря методам группового производства;
- высокая технологичность, позволяющая объединить на одном кристалле с преобразователем схему предварительной обработки сигнала, а в ряде случаев изготовить на едином кристалле законченное устройство, включающее в себя электронные, механические, оптические и прочие компоненты;
- широкий диапазон измерения;
- высокая виброустойчивость.

Одно из подобных изделий изображено на рис.1.2,а. Это емкостный двухосевой акселерометр третьего поколения ADXL250 фирмы Analog Devices, запущенный в серийное производство в сентябре 1996 года [9]. И электрические и механические части этого устройства изготовлены в едином технологическом процессе на одном кристалле. Чувствительные элементы расположены в окружении электронных блоков предварительной обработки сигнала и буферных каскадов. Этот преобразователь характеризуется относительно низким уровнем шумов

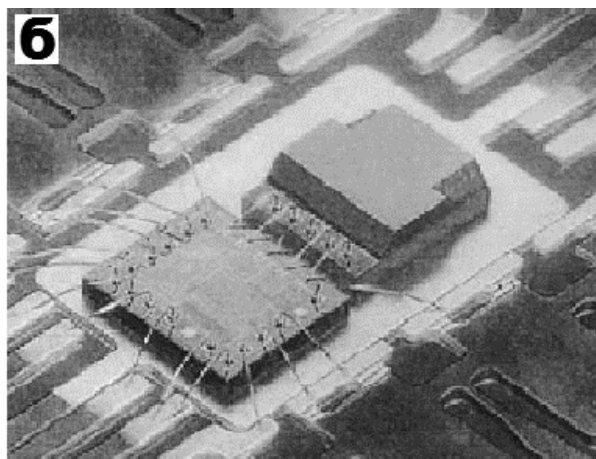
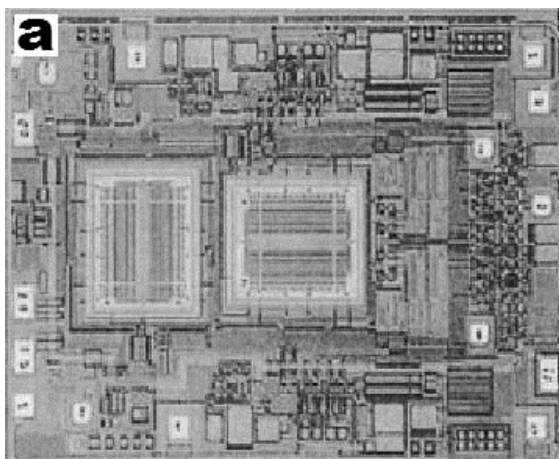


Рис. 1.2. Серийно выпускаемые микроакселерометры:

- а – полностью интегрированный планарный микроакселерометр ADXL250 фирмы Analog Devices [9];
- б – микроакселерометр MMA1260D фирмы Freescale [10]

(плотность шума $1 \frac{mg}{\sqrt{Гц}}$), широким динамическим диапазоном (80 дБ), малой потребляемой мощностью (6,4 мВт/ось) и низким дрейфом при нулевом ускорении в промышленном диапазоне температур (0,4 g на диапазоне температур $-40^{\circ}C \div +85^{\circ}C$). Его разрешение в диапазоне измерений $\pm 50g$ составляет 10 мг. Единственный внешний прибор, необходимый для нормальной работы акселерометра, – развязывающий конденсатор источника питания. Поставляется в 14-выводном керамическом корпусе, монтируемом на поверхность печатной платы. Стоимость одного прибора – менее 10 долларов.

Фирма Analog Devices разрабатывает интегральные акселерометры с 1991 года. Первые акселерометры типа ADXL50, занимающие совместно со схемой формирования сигнала площадь кристалла в 5 мм^2 , были выпущены на рынок в 1993 г. Цена такого акселерометра составляла 12 долларов против 200 долларов для применявшихся тогда преобразователей на базе традиционных механических конструкций. Акселерометр имел

аналоговый выход, чувствительность составляла 19 мВ/г, рабочий диапазон устройства находился в пределах $\pm 50\text{g}$, а плотность шума составляла $6,5 \frac{\text{mg}}{\sqrt{\text{Гц}}}$. В настоящее время фирмой выпускаются гораздо более сложные приборы, соответствующие по степени интеграции уровню СБИС [14], такие, например, как преобразователи угловой скорости семейства ADXRS или акселерометры серии ADXL202 [9]. Датчик ADXRS300 способен измерять угловую скорость в диапазоне ± 300 °/сек, работает в температурном диапазоне от -40°C до $+85^\circ\text{C}$ и имеет цифровой выход, а плотность его шумов составляет $0,1 \frac{^\circ/\text{сек}}{\sqrt{\text{Гц}}}$. Акселерометр ADXL202E имеет плотность шумов $200 \frac{\text{мкг}}{\sqrt{\text{Гц}}}$ и разрешение не хуже 2 мг в полосе 60 Гц, измеряет ускорение как в динамическом, так и в статическом режиме. Предусмотрен интерфейс с 1 МГц-микроконтроллером. Дрейф при нулевом ускорении в диапазоне температур от 0°C до $+50^\circ\text{C}$ – 0,05 g.

Фирма Freescale также является крупнейшим производителем кремниевых преобразователей различного назначения (в основном, акселерометрических и датчиков давления), однако при изготовлении УЧЭ во многих случаях предпочтение отдается объемной кремниевой технологии [1,3], не дающей возможности изготовить управляющую электронную схему в одном технологическом процессе с чувствительным элементом. В этом случае оказывается более удобным изготовить их по отдельности, а потом вместе смонтировать в корпус, как изображено на рис.1.2,б, что существенно повышает стоимость изделия. Подобное исполнение имеет, однако, преимущество, заключающееся в том, что такой преобразователь может быть оснащен специализированной управляющей электронной схемой, выполненной по радиационно-стойкой технологии, и, следовательно, может быть использован в космических

аппаратах, системах военного назначения и в любой другой аппаратуре, потенциально подверженной действию ионизирующих излучений. Чувствительные элементы акселерометров изготавливаются по классической маятниковой схеме [17]. Фирма предлагает акселерометры для измерения ускорений в диапазонах от $\pm 1,5g$ до $\pm 250g$ с полосой пропускания до 400 Гц, требующих напряжение питания 5 В и выпускаемых в корпусах DIP, SOIC или Wingback. Изображенный на рис.1.2,б акселерометр MMA1260D имеет рабочий диапазон $\pm 1,5g$, полосу пропускания 400 Гц, плотность шумов составляет $0,2 \text{ мг} / \sqrt{\text{Гц}}$.

Подробную информацию о технических характеристиках преобразователей компании Freescale, а также статьи по их применению с описанием основных схемных и конструктивных решений можно найти на сайте Сектора полупроводниковых компонентов компании [10].

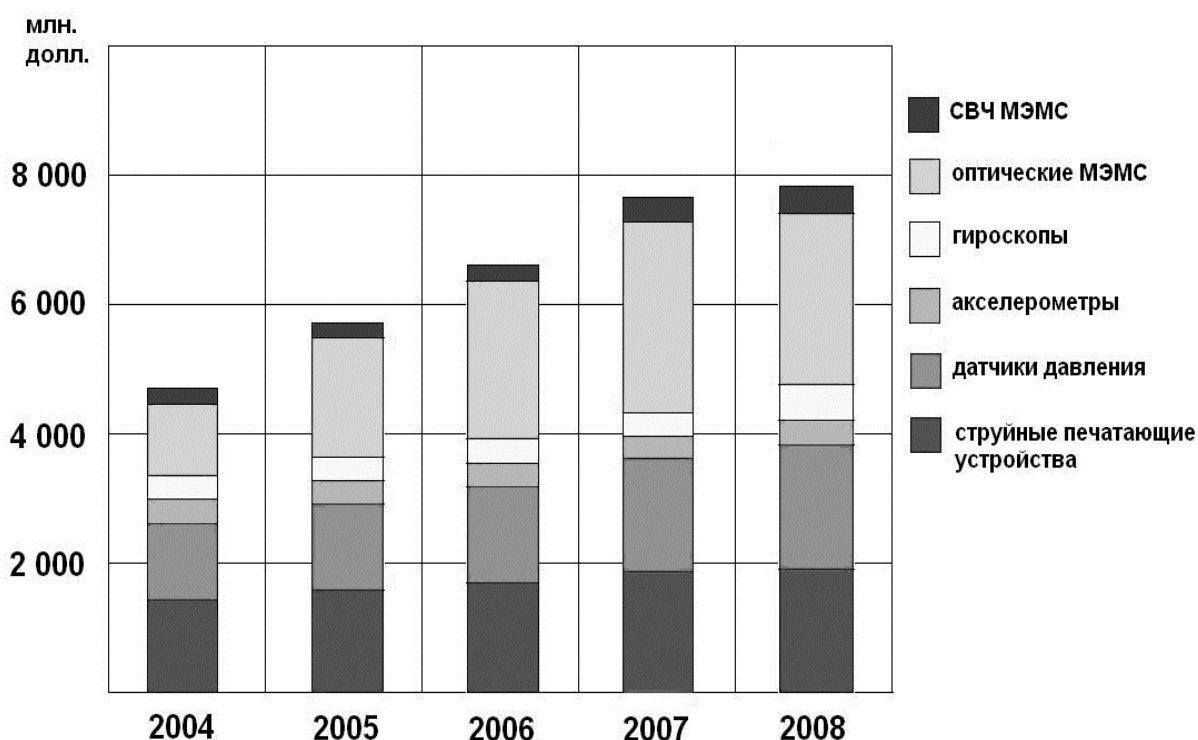


Рис. 1.3. Развитие рынка МЭМС с 2004 по 2008 гг.
(по данным компании Yole Developpement [18])

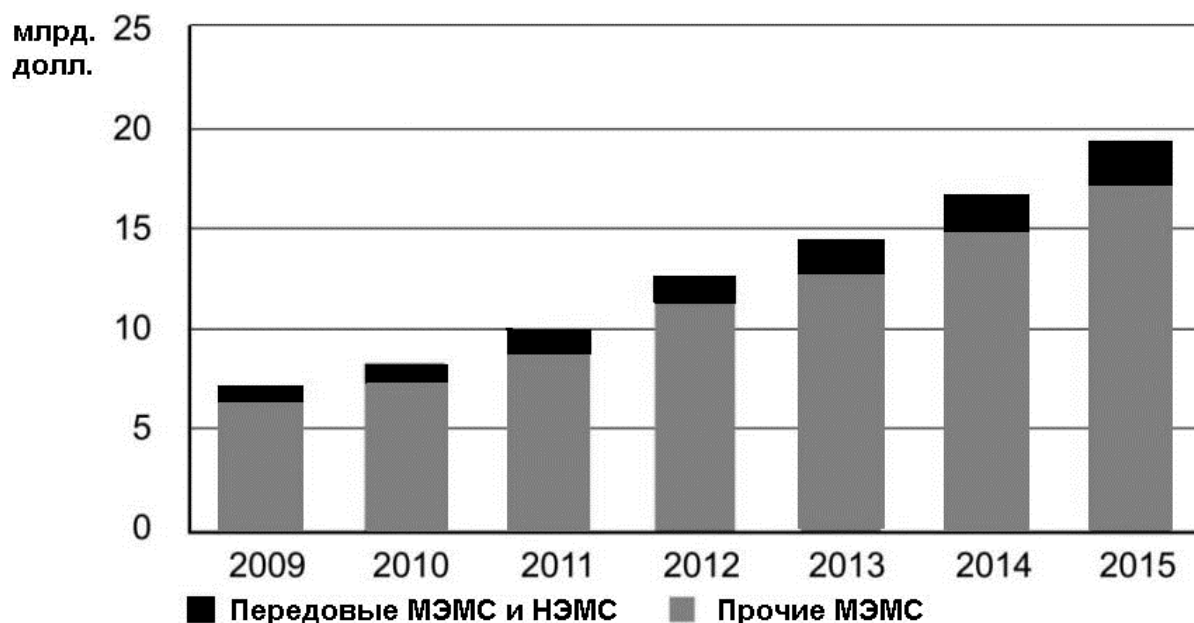


Рис. 1.4. Прогноз развития рынка МЭМС до 2015 г.
(по данным компании Yole Développement [19])

Диаграммы, иллюстрирующие развитие рынка МЭМС с 2004 г. по 2008 г., а также его прогнозируемое развитие до 2015 г. (по данным компании Yole Développement), представлены соответственно на рис.1.3 и рис.1.4.

В последнее время в литературе часто встречаются сообщения о разработках в области НЭМС-технологий (НЭМС – «нанoeлектроmеханические системы») [20,21]. Под НЭМС-устройствами можно понимать микросистемы, содержащие в себе элементы, либо сами по себе имеющие нанометровый размер, либо разнесенные друг от друга на расстояния того же порядка. Функционирование НЭМС устройств основано на физических эффектах, наблюдаемых на этих расстояниях, таких, например, как действие атомных сил или туннелирование электронов. Исследования механических свойств наноразмерных конструкций выявили их явно выраженную функциональность, что и привело к становлению области нанoeлектроmеханических систем.

Несмотря на свои внушительные размеры, одними из первых серийно производящихся наноэлектромеханических устройств по праву могут считаться сканирующие зондовые микроскопы [21÷24] – основные инструменты нанотехнологии, так как в них при помощи электромеханических приводов регулируются параметры нанометрового зазора между подложкой и зондом.

С помощью наноразмерных электростатически возбуждаемых кантилеверов становится возможным измерять массу отдельных бактерий или даже молекул ДНК путем регистрации сдвига резонансной частоты кантилевера, «захватившего» нанообъект – бактерию, вирус или молекулу ДНК [25,26]. Для того, чтобы гарантировано происходил захват того или иного объекта, кантилевер покрывается специальными маркерами, в случае «взвешивания» вирусов – соответствующими антителами. Предполагается, что подобные устройства могут быть в перспективе применены для быстрой диагностики заболеваний, для определения биологического заражения местности и т.п.

Примером экспериментальной НЭМС может служить устройство, изображенное на рис.1.5. Этот прибор, разработанный сотрудниками Мюнхенского университета [27], представляет собой два механически связанных НЭМС-резонатора и может быть использован как перестраиваемый частотный фильтр. Устройство состоит из двух кремниевых мостиков длиной 920 нм и поперечным сечением $80 \times 100 \text{ нм}^2$, подвешенных на расстоянии 80 нм друг от друга. Расстояние между каждым из них и соответствующим противоэлектродом также равно 80 нм. Последний нужен для подачи постоянного смещения на проводники в целях регулировки резонансной частоты, которая может лежать в области СВЧ. Механическое возбуждение висящего мостика происходит за счет сил Лоренца в ортогональном магнитном поле ($B = 1 \div 10 \text{ Тл}$) при совпадении частоты протекающего по мостику тока с собственной

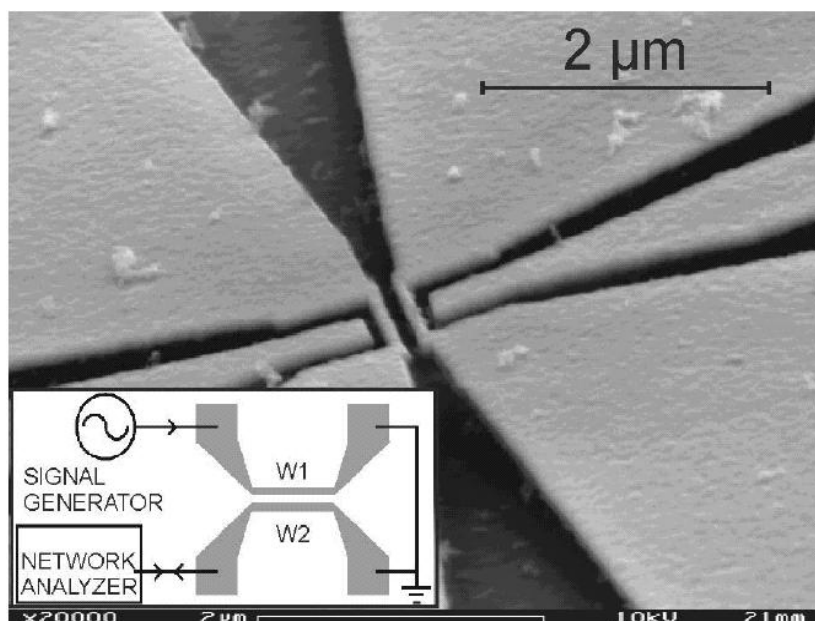


Рис. 1.5. Резонансный наноэлектромеханический фильтр [27]

резонансной частотой мостика. От анализатора на один из проводников (сигнальный) подается переменный сигнал, и одновременно регистрируется отраженная мощность. Взаимодействие мостиков приводит к сдвигу резонансной частоты одного из них, находящегося в зависимости от частоты, подаваемой на второй мостик. Устройство функционировало при пониженных температурах ($T = 1,5 \div 250$ К). Приборы такого типа не могут массово применяться, так как для их работы необходимы низкие температуры и сильные магнитные поля.

Отсутствие такой необходимости выгодно отличает от вышеописанного устройства другой наноэлектромеханический прибор – изображенный на рис.1.6 одноэлектронный транзистор с резонансной «колонной» [28], которая благодаря своим размерам может совершать под действием электрических сил механические колебания на частотах до 1 ГГц и переносить на себе электрический заряд от «источка» к «стоку» посредством электронного туннелирования. Прибор функционирует при комнатной температуре. В работе [28] также отмечается, что уменьшение

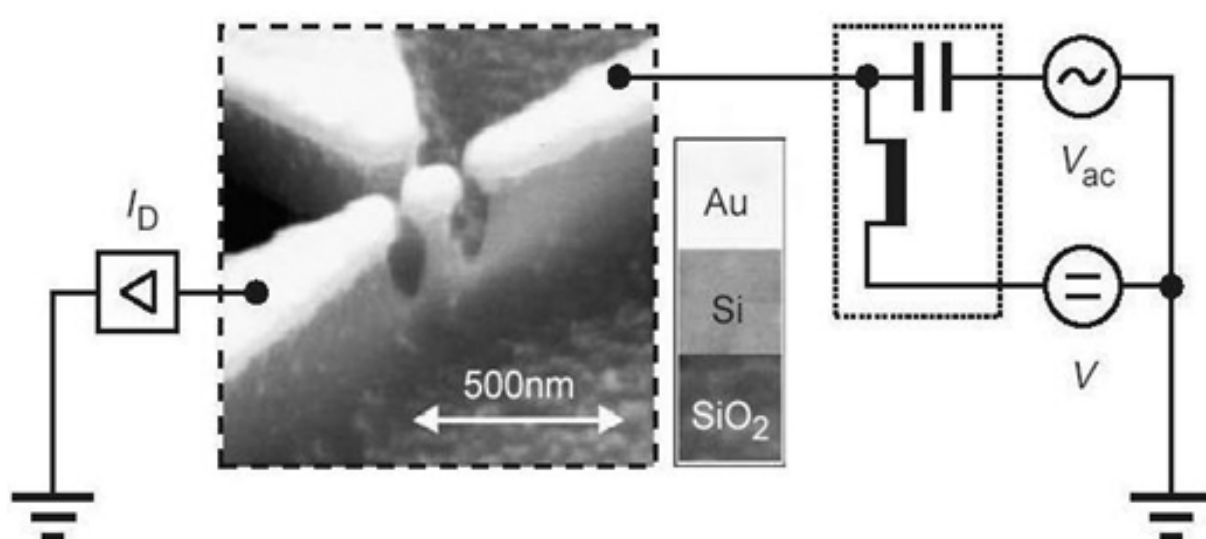


Рис. 1.6. Одноэлектронный нанотранзистор с резонансной «колонной» [28]

размеров электромеханических устройств до нанометровых позволяет приблизиться к экспериментальному изучению квантовых аспектов механического движения, и приводится новый термин – «квантовая электромеханика».

Оба прибора, изображенных на двух предыдущих рисунках, изготовлены с применением электронной литографии сверхвысокого разрешения на структурах КНИ (кремний-на-изоляторе, английская аббревиатура SOI – Silicon On Insulator), полученных методом ионной имплантации.

К нанoeлектромеханическим устройствам можно отнести также и туннельные преобразователи [29÷44], которым посвящена настоящая монография.

1.2. Основные работы по созданию преобразователей физических величин на основе туннельного эффекта

После изобретения СТМ [22] в зарубежной литературе появилось множество публикаций, посвященных разработке туннельных преобразователей [29÷44]. Они обещают иметь весьма небольшие размеры, кроме того, к их достоинствам относятся уникально высокая чувствительность и широкий спектр применений. Так, например, туннельные преобразователи предлагается использовать как при измерении напряженности магнитного поля [29,42], так и в акселерометрах [32,33,35,36, 39÷41, 43], или же в преобразователях инфракрасного излучения [30,31].

Туннельные преобразователи имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными емкостными. В частности, у емкостного преобразователя коэффициент трансформации механической величины в электрическую равен коэффициенту обратного воздействия. Поэтому, чем меньшее смещение необходимо регистрировать, тем большее обратное воздействие оказывается на измеряемый объект. Следовательно, выбор туннельного преобразователя для регистрации малых смещений значительно повышает чувствительность метода измерения. Кроме того, от степени миниатюризации чувствительного элемента практически не зависит чувствительность преобразователя, в отличие от тех же емкостных преобразователей. Было показано, что с помощью туннельного преобразователя может быть достигнут квантовый предел по измерению расстояний [45,46]. В работах [33,34] указывается, что при помощи акселерометра на основе туннельного преобразователя возможно измерение ускорений с точностью до $10^{-9}g$, что на порядки выше точности,

обеспечиваемой существующими на сегодняшний день серийно производящимися устройствами.

Принцип работы туннельного преобразователя (также, как и туннельного микроскопа) основан на измерении туннельного тока, протекающего в зазоре между чувствительным подвижным электродом и фиксированной иглой (рис.1.7). Характерный размер зазора, при котором начинает проявляться эффект туннелирования электронов, составляет единицы нанометров.

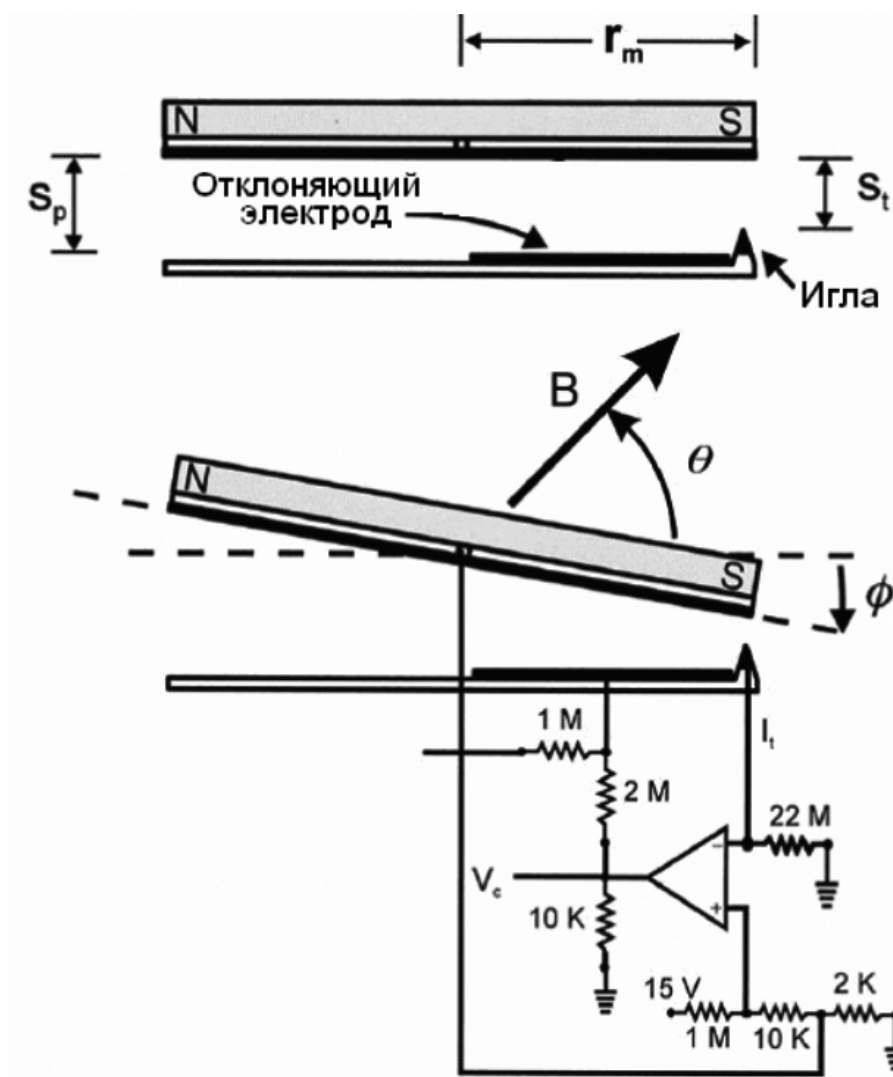


Рис. 1.7. Измеритель магнитной индукции на туннельном преобразователе [29]

Известно, что туннельный ток между электродами, поднесенными друг к другу на соответствующее расстояние (в квазиклассическом приближении, при $T=0$, в случае потенциального барьера произвольной формы $\varphi(z)$, считая, что масса электрона m изотропна во всем рассматриваемом пространстве), выражается следующим образом [47]:

$$I = \frac{S\alpha}{\delta_z^2} \left\{ \bar{\varphi} \exp(-A\delta_z\sqrt{\bar{\varphi}}) - (\bar{\varphi} + eV) \exp(-A\delta_z\sqrt{\bar{\varphi} + eV}) \right\}, \quad (1.1)$$

где e – заряд электрона; S – площадь области протекания туннельного тока; V – приложенная разность потенциалов, $A = 2\beta\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}}$, $\bar{\varphi} = \frac{1}{\delta_z} \int_{z_1}^{z_2} \varphi(z) dz$ – среднее значение потенциального барьера, отсчитанное от уровня Ферми отрицательно заряженного электрода, $\alpha = e/4\pi^2\beta^2\hbar$, $\beta = 1 - \frac{1}{8\bar{\varphi}^2\delta_z} \int_{z_1}^{z_2} (\varphi(z) - \bar{\varphi})^2 dz$ – безразмерный коэффициент, $\delta_z = z_2 - z_1$ – ширина потенциального барьера, $\hbar$ – постоянная Планка.

В случае низких прикладываемых напряжений ($\bar{\varphi} \gg eV$, рис1.8,а) формулу (1.1) можно упростить:

$$I = \frac{S\gamma\sqrt{\bar{\varphi}}V}{\delta_z} \exp(-A\delta_z\sqrt{\bar{\varphi}}), \quad (1.2)$$

где $\gamma = \frac{e\sqrt{2m}}{4\beta\pi^2\hbar^2}$. Таким образом, в случае малого значения прикладываемого напряжения туннельный ток линейно зависит от V . $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$, $\delta_z = L$, L – расстояние между электродами.

Если $0 < eV < \varphi_2$ (случай промежуточного значения напряжения, рис1.8,б), то $\delta_z = L$, а $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 - eV}{2}$. В этом случае зависимость тока от напряжения можно выразить следующим образом:

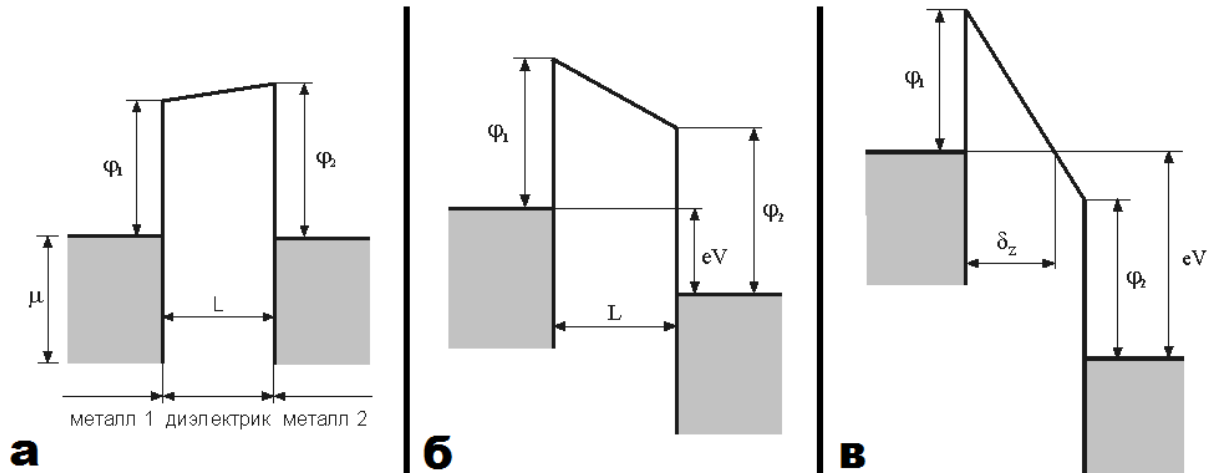


Рис. 1.8. Схематическое изображение энергетических диаграмм туннельного перехода в случае различных значений подаваемой разности потенциалов V :

а – энергетическая диаграмма в случае $V \sim 0$;

б – энергетическая диаграмма в случае $0 < eV < \varphi_2$;

в – энергетическая диаграмма в случае $eV > \varphi$

$$I = \frac{S\gamma\sqrt{\bar{\varphi}}}{\delta_z} \exp\left(-A\delta_z\sqrt{\bar{\varphi}}\right) (V + \sigma V^3), \quad (1.3)$$

где $\sigma = \frac{(Ae)^2}{96\bar{\varphi}\delta_z^2} - \frac{(Ae)^2}{32\bar{\varphi}^{3/2}\delta_z}$.

В случае, изображенном на рис 1.8,в, когда $eV > \varphi_2$,

$\delta_z = \frac{L\varphi_1}{(\varphi_1 - \varphi_2 + eV)}$, а $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1}{2}$. Подставляя это в (1.1), получим:

$$I = \frac{e^3 F^2 S}{8\pi^2 \hbar \varphi_1 \beta^2} \left\{ \exp\left(-\frac{2\beta}{eF} \varphi_1^{3/2} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar}\right) - \right. \\ \left. - \left(1 + \frac{2eV}{\varphi_1}\right) \exp\left(-\frac{2\beta}{eF} \varphi_1^{3/2} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \sqrt{1 + \frac{2eV}{\varphi_1}}\right) \right\}. \quad (1.4)$$

Здесь $F=V/L$ – напряженность электрического поля.

При очень высоких напряжениях ($eV > \varphi_1 + \mu$) уровень Ферми 2-ого электрода лежит ниже дна зоны проводимости 1-ого электрода. Поэтому при таких условиях, электроны не могут туннелировать из 2-ого в 1-ый электрод, так как нет свободных уровней. Совершенно обратная ситуация наблюдается для противоположного направления туннелирования, так как для электронов 1-го электрода становятся доступны все свободные уровни 2-го электрода. Такая ситуация аналогична явлению холодной эмиссии электронов из металла в вакуум. Таким образом, так как $eV > \varphi_1 + \mu$, то вторым слагаемым в (1.4) можно пренебречь, и, соответственно:

$$I = \frac{S\gamma\sqrt{\varphi}V}{\delta_z} \exp\left(-A\delta_z\sqrt{\varphi}\right), \quad (1.5)$$

где коэффициент $\beta = 23/24$. Полученный результат качественно совпадает с аналитическим выражением (уравнение Фаулера-Нордгейма) для плотности тока автоэлектронной эмиссии [48÷50].

На рис.1.9 приведена теоретическая характеристика напряжение-ток для пары из платинового и углеродного электродов при контактной площади 10^{-17} м^2 .

Из выражения (1.3) следует, что изменение расстояния между находящимися в туннельном контакте электродами на 1 Å может привести к изменению туннельного тока в 3 или более раз. Кроме того, обращает на себя внимание тот факт, что в случае малых и промежуточных значений напряжения значительное изменение разности потенциалов не сопровождается сильным изменением тока, в отличие от режима автоэлектронной эмиссии. Так, в случае $L=0,6 \text{ нм}$ изменение V на порядок с 5В до 0,5В вызывает уменьшение тока только в 40 раз. В случае автоэлектронной эмиссии аналогичное изменение напряженности поля от 5 В/0,6 нм до 0,5 В/0,6 нм приводит к уменьшению эмиссионного тока

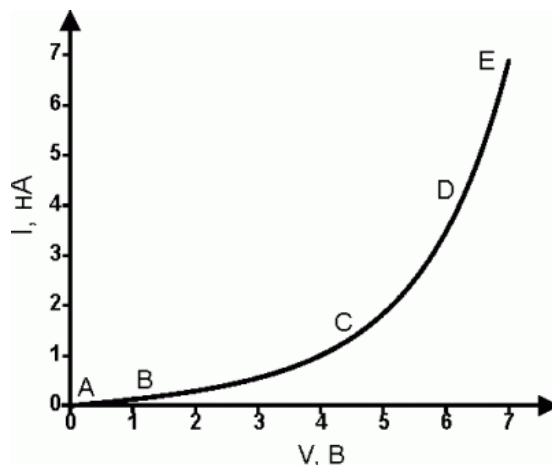


Рис. 1.9. Вольтамперная характеристика при ширине барьера $\delta z=5\text{\AA}$ и контактной площади $S=10^{-17}\text{м}^2$; обозначенные участки кривой получены по формулам: AB – (1.2), BC – (1.3), CD – (1.4), DE – (1.5)

более, чем на 25 порядков. Следовательно, основным отличием эмиссионных преобразователей от туннельных является очень высокая чувствительность к изменению подаваемой разности потенциалов, тогда как туннельные преобразователи весьма чувствительны к изменению межэлектродного расстояния.

Подвод чувствительного подвижного электрода к игле на туннельное расстояние (~ 1 нм) осуществляется путем приложения соответствующей разности электрических потенциалов между чувствительным и отклоняющим электродами, вследствие чего между ними возникает электростатическое притяжение. Для поддержания устойчивого туннельного контакта прибор должен управляться при помощи обратной связи: измеряя туннельный ток, необходимо поддерживать величину зазора (и, следовательно, величину самого тока) на одном уровне. Это осуществляется при помощи отклоняющих электродов. Величина сигнала ошибки обусловлена воздействием, оказываемым на подвижный электрод

измеряемой физической величиной. Выходным сигналом устройства является управляющее напряжение обратной связи.

На рис.1.7 схематически изображен измеритель магнитной индукции на туннельном преобразователе, разработанный в Исследовательской лаборатории ВМС США (Naval Research Laboratory) совместно с Лабораторией реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory) [29]. Прибор состоит из УЧЭ и электронной схемы, реализующей обратную связь. Чувствительный элемент включает в себя иглу, отклоняющий электрод и расположенный над ними торсионный элемент с магнитным покрытием. Экспериментально измеренная чувствительность этого прибора составила $0.3 \frac{nT}{\sqrt{Гц}}$. Подробный анализ работы управляющей схемы можно найти в [44].

В Лаборатории микросистем и датчиков Стэнфордского университета также широко велись работы по созданию преобразователей на туннельном эффекте [30÷33, 35, 36]. На рис.1.10,а изображен один из вариантов УЧЭ туннельного акселерометра. Здесь туннелирование электронов происходит между неподвижной иглой и массивным электродом, подвешенным на упругой перемычке. Электронная схема, реализующая обратную связь, незначительно отличается от применяемой в упомянутом выше туннельном измерителе магнитной индукции. Расчеты и эксперименты показали, что чувствительность этого устройства составляет около $20 \frac{ng}{\sqrt{Гц}}$. Эта же лаборатория также занимается разработкой туннельных преобразователей инфракрасного излучения [30, 31], включающих в себя в качестве УЧЭ диафрагменную микромеханическую структуру (рис.1.10,б), подобную используемой в прецизионных датчиках давления.

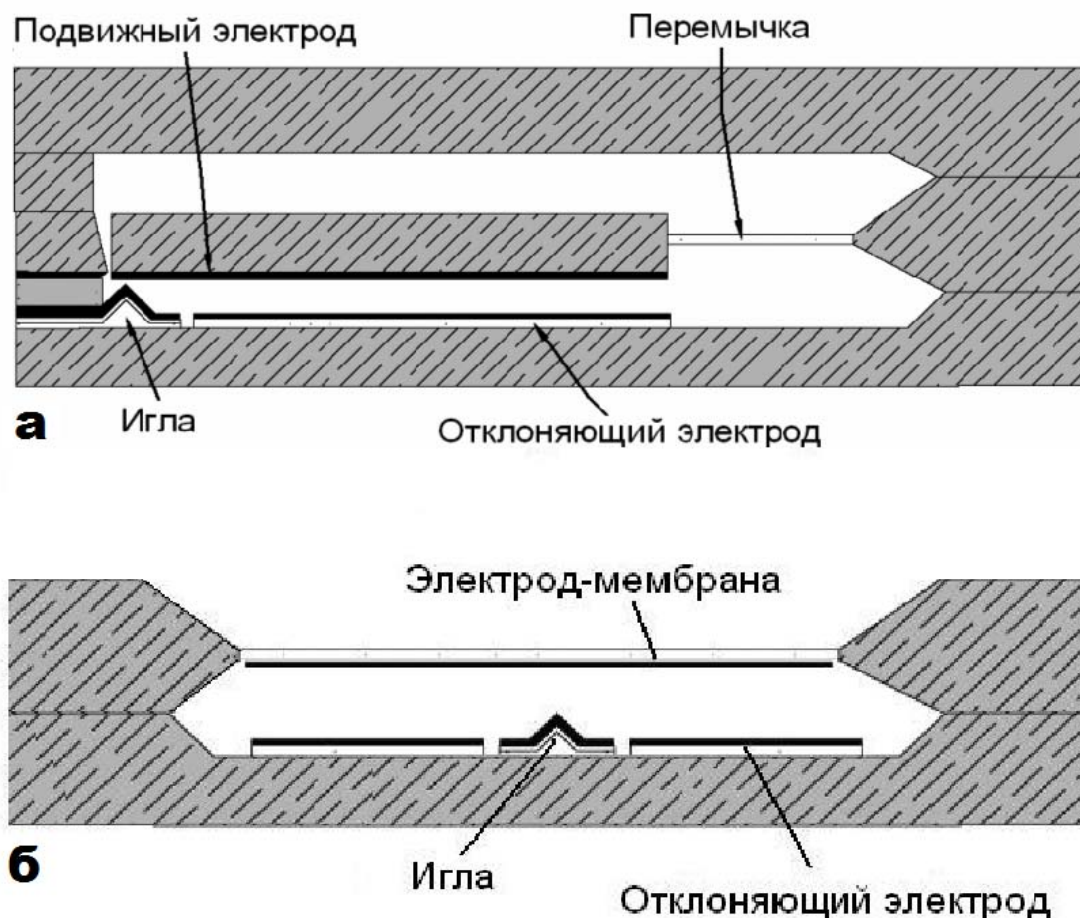


Рис. 1.10. Упругие чувствительные элементы туннельных устройств, разработанных в Лаборатории микросистем и преобразователей Стэндфордского университета [30÷33, 35, 36]:

- а – УЧЭ акселерометра;
- б – диафрагменный УЧЭ преобразователя давления или ИК-излучения

Существует также ряд работ, в которых для построения сверхчувствительных преобразователей предлагается использовать эффект туннелирования электронов из проводника в вакуум – холодную электронную эмиссию [51÷53]. Возможность создания таких приборов была отмечена еще в 1966 году Р.Янгом, создателем прототипа

сканирующего туннельного микроскопа, в котором использовалась холодная эмиссия электронов [51]. Об использовании туннельных преобразователей в эмиссионном режиме упоминается также в работах [37, 43]. Эмиссионный ток, как и туннельный, имеет достаточно сильную зависимость от расстояния между контактами, а характерные токи и расстояния между электродами в таком устройстве могут оказаться существенно выше, чем в туннельных преобразователях.

Это позволило бы осуществлять долговременное удержание электродов на заданном расстоянии друг от друга без использования обратной связи, расширить динамический диапазон устройства, а также значительно снизить требования к электронным компонентам, используемым в усилительных каскадах схемы управления. При построении эмиссионного преобразователя возникает задача вакуумирования межэлектродного пространства, которая может быть решена по-разному в зависимости от способа изготовления преобразователя (например, при помощи технологии прямого сращивания пластин – т.н. «Wafer bonding» [54÷56]), хотя и делает его производство более дорогим.

В работах [38, 39] предлагается реализация латерального ЧЭ туннельного преобразователя, в конструкции которого для поддержания туннельного расстояния на постоянном уровне используются широко распространенные гребенчатые актюаторы, характерные для большинства микроэлектромеханических устройств (рис.1.11). Механическая часть прибора изготавливается по «одномасочной» технологии объемной микрообработки SCREAM [3,57]. Подобный тип чувствительного элемента удобен с точки зрения сопряжения с компонентами управляющей электронной схемы, однако спектр его применений ограничен по сравнению с туннельными преобразователями, содержащими вертикально ориентированную иглу.

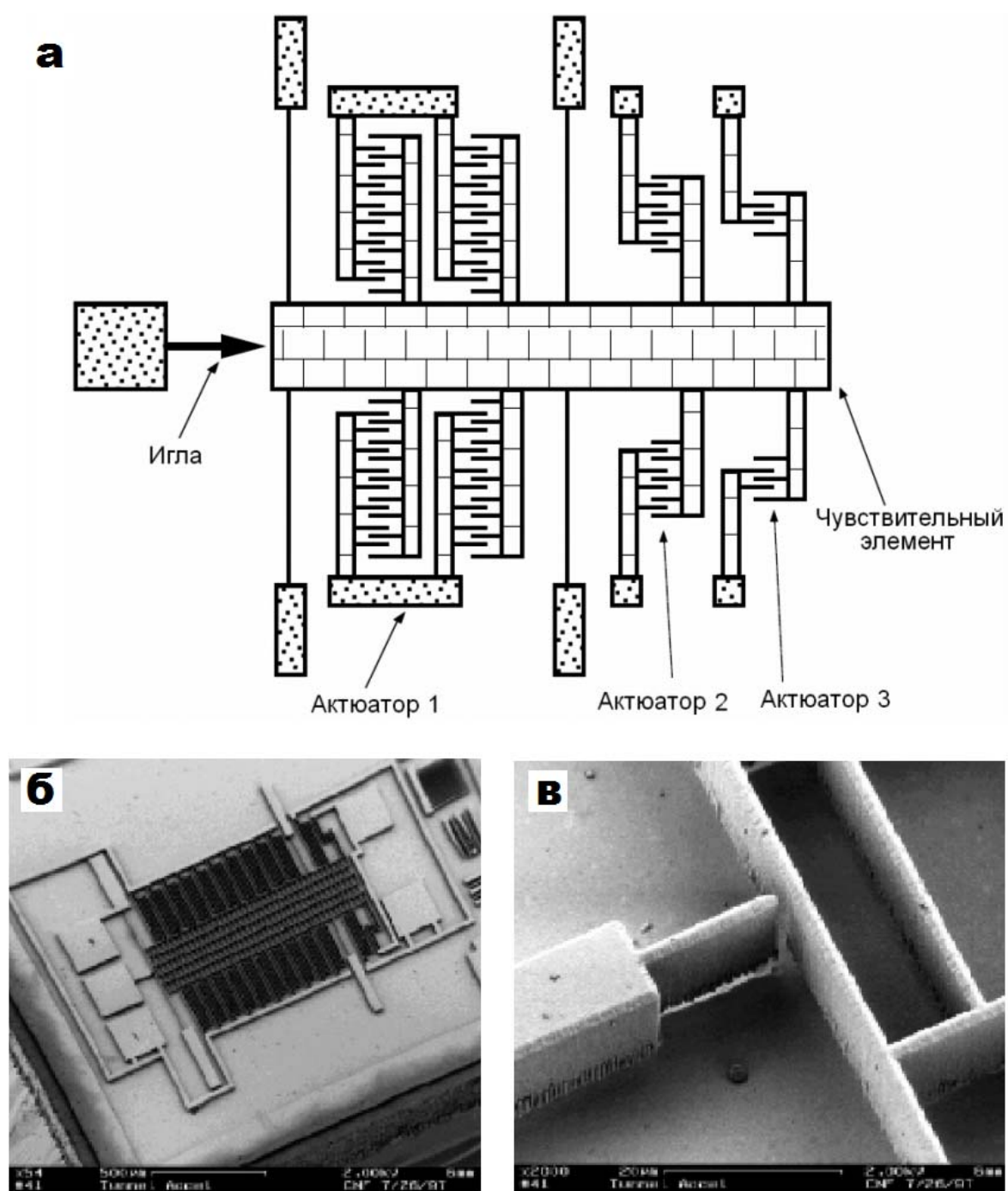


Рис. 1.11. Чувствительный элемент латерального туннельного акселерометра [38, 39]:
 а – схематическое изображение;
 б – РЭМ-снимок чувствительного элемента (общий вид);
 в – РЭМ-снимок иглы чувствительного элемента

Для достижения элементами описываемого устройства требуемых упругих и инерционных характеристик часто бывает необходимо добиваться высокого аспектного отношения толщины элемента к его латеральному размеру. Поэтому при производстве таких приборов возникает необходимость в применении специальных не относящихся к стандартной технологии процессов, позволяющих реализовать «глубокое» травление кремния [58,59]. По этой же причине было бы желательно при изготовлении таких устройств использовать микрообработку полупроводниковых структур КНИ, полученных упомянутым методом срачивания окисленных кремниевых пластин. Эта технология позволяет достигать для микромеханических структур высоких аспектных отношений толщины к линейному размеру, оставаясь при этом планарной. При этом значительно облегчается интеграция механических частей устройства с управляющими электронными схемами.

Структуры КНИ, полученные методом срачивания пластин не изготавливаются серийно отечественной полупроводниковой промышленностью, но могут быть приобретены у зарубежных производителей. В частности, выпуском и продажей таких структур занимается фирма Silicon Valley Microelectronics, Inc. [60]. Их основным недостатком является относительная дороговизна, объясняющаяся необходимостью использования в производстве ряда нестандартных процессов, проводящихся на специальном оборудовании в особо чистых помещениях.

Для повышения эффективности работы используемых в устройстве гребенчатых электростатических актюаторов может оказаться целесообразным изготавливать их с применением метода локального окисления совместно с соответствующей послеоперационной юстировкой [61]. В этом случае возможно получение субмикронного зазора между электродами гребенчатого актюатора, что может значительно расширить

диапазон перемещений и снизить используемые отклоняющие электрические напряжения.

Во многих из перечисленных зарубежных работ упругие чувствительные элементы туннельных преобразователей изготавливаются по так называемой технологии объемной микрообработки кремния, которая используется с целью получения микромеханических структур с самого момента зарождения этой области техники [1]. Она подразумевает химическую обработку пластины целиком, сводится, как правило, к формированию в толще пластины стоп-слоев, не подверженных действию используемых травителей, и последующему травлению, которое может быть как изотропным, так и анизотропным, в зависимости от используемых веществ и технологических режимов.

Эта технология имеет ряд недостатков по сравнению с технологией планарной микрообработки, подразумевающей использование традиционных и модифицированных процессов, принятых при производстве микроэлектроники, строящихся на многократных циклах осаждения материала, переноса изображений и удаления материала (технология жертвенного слоя). К числу недостатков объемной технологии по сравнению с планарной можно отнести дороговизну изделия, трудность (а иногда и невозможность) интеграции механических и электронных компонентов изделия на одном кристалле, а также, в некоторых случаях, малый выход годных.

В России созданием преобразователей с использованием как туннельного эффекта, так и эффекта холодной электронной эмиссии занимается исследовательская группа из Института физики микроструктур РАН (г. Н. Новгород). Изготовленный ими макет туннельно-эмиссионного преобразователя ускорений [37,43] имеет порог обнаружения менее $10^{-4} \frac{g}{\sqrt{G_u}}$ в туннельном режиме и менее $10^{-3} \frac{g}{\sqrt{G_u}}$ в эмиссионном

режиме в диапазоне частот до 6 кГц. При создании макета технология микрообработки не использовалась, применялись пьезокерамические манипуляторы и узлы, изготавливаемые в условиях механической мастерской.

Настоящая монография также посвящена созданию туннельного преобразователя [62÷65], исполнение которого проводится, однако, по полностью планарной технологии, что позволяет осуществить интеграцию на одном кристалле чувствительного элемента и управляющих электронных схем. Подробное описание разработанных конструкций чувствительных элементов туннельных преобразователей, а также технологии их изготовления можно найти соответственно в главах 2 и 3 настоящей книги. Интеграция на общей кремниевой подложке чувствительного элемента, построенного с применением кремниевой электромеханики, и электронного блока (пикоамперметра и цепи регулирования величины туннельного зазора) позволит создать НЭМС туннельного преобразователя. Это устройство в зависимости от поставленных задач может включать в себя нужное число различных УЧЭ с управляющими электронными схемами, а также процессоры для обработки сигналов и приемопередающий радиомодуль, интегрированные на одном кристалле. Такие приборы, благодаря своим малым габаритам и дешевизне, могут быть изготовлены и распределены по объекту измерения в большом количестве, обмениваясь информацией по радиоканалу.

В отечественной литературе до сих пор не встречалось публикаций, посвященных разработке и созданию подобных микросистем, электронные и механические части которых были бы изготовлены в едином технологическом процессе.

За рубежом был опубликован ряд работ [40,41], посвященных вопросу создания планарных туннельных акселерометров. В [40] описана конструкция планарного туннельного акселерометра, чувствительным

элементом которого является поликремниевая консольная структура (рис.1.12), приводящаяся в туннельный контакт с вертикально ориентированной иглой. Эта структура допускает однокристалльную интеграцию с управляющей электроникой и может использоваться при построении преобразователей различных физических величин. Технология изготовления такого прибора наиболее близка к описываемому в диссертационной работе методу изготовления монолитных зондовых чувствительных элементов туннельных преобразователей.

Как диафрагменная, так и консольная конструкция чувствительного элемента позволяет в широких пределах варьировать жесткостные свойства и, соответственно, рабочую полосу частот таких преобразователей посредством изменения их основных конструктивных параметров.

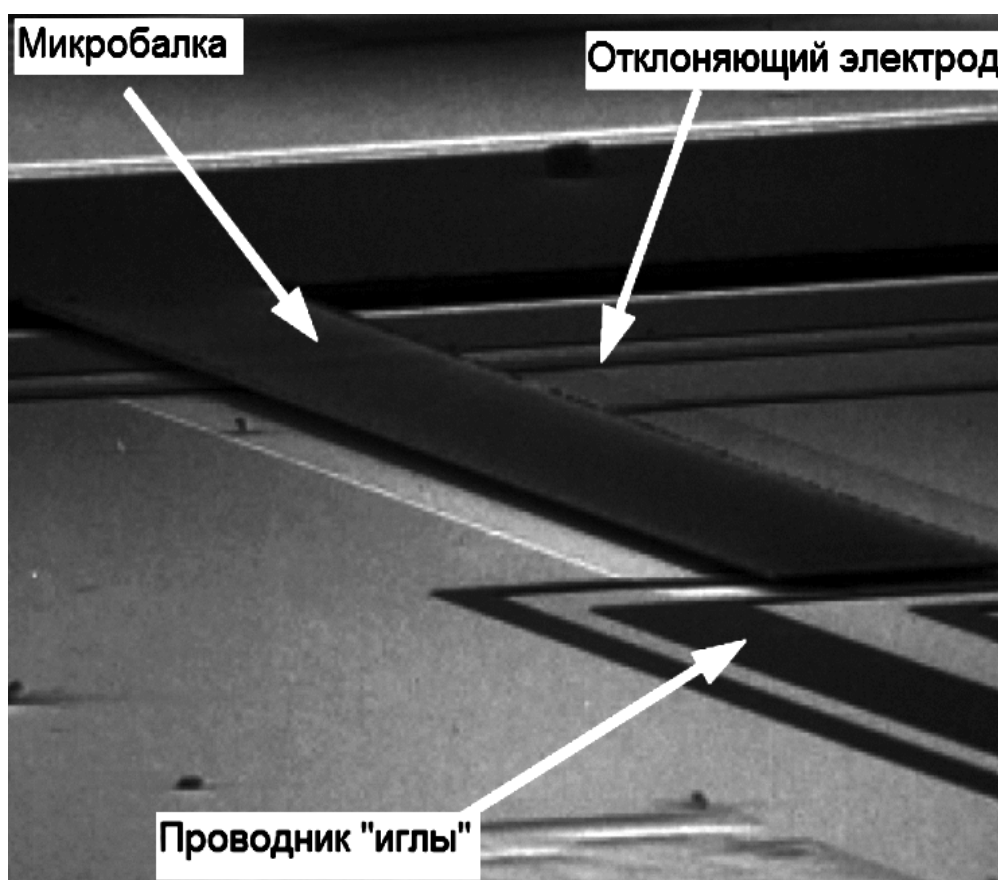


Рис. 1.12. Планарный туннельный акселерометр консольного типа

Разработка и создание монолитных туннельных преобразователей, допускающих однокристалльную интеграцию чувствительных элементов с электронными управляющими схемами требует решения широкого спектра научно-технических задач, связанных с разработкой и оптимизацией конструктивных, технологических и схемотехнических решений, применяемых при изготовлении как чувствительного элемента, так и управляющей электронной схемы, осуществлении однокристалльной интеграции указанных частей измерительной микросистемы.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧЭ ТУННЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

2.1. Конечноэлементный расчет напряженно-деформированного состояния многослойных УЧЭ туннельных преобразователей

Настоящий раздел посвящен численному расчету напряженно-деформированного состояния УЧЭ монолитного туннельного преобразователя. В основу предлагаемой методики положен метод конечных элементов (МКЭ) [66]. Необходимость выбора данного метода обусловлена тем, что элементы современных интегральных микроэлектромеханических устройств (в частности, УЧЭ туннельного преобразователя) представляют собой многослойные конструкции сложной геометрии, не поддающиеся аналитическому расчету. Для моделирования напряженно-деформированного состояния подвижных компонентов МЭМС предлагается использовать конечноэлементный метод расчета многослойных пластин.

2.1.1. Методика расчета динамического напряженно-деформированного состояния многослойных пластин

Задача об изгибе и колебаниях многослойных пластин сложной геометрии решалась при помощи метода конечных элементов [66,70,107]. Сущность этого метода состоит в разбиении сплошного тела на отдельные элементы, взаимодействующие между собой лишь в узловых точках, в которых вводятся фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов.

Конечноэлементное уравнение движения выглядит следующим образом:

$$[K]\{\delta\} + [C]\frac{\partial}{\partial t}\{\delta\} + [M]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\delta\} + \{F\} = 0, \quad (2.1)$$

где $[K]$ и $\{F\}$ – матрицы жесткости и сил ансамбля, а $\{\delta\}$ – узловые степени свободы.

Матрицы $[C]$ и $[M]$ составляются из матриц отдельных элементов, задаваемых в виде:

$$\begin{aligned} [c_{ij}]^e &= \int_{V^e} [N_i]^T \mu [N_j] dV, \\ [m_{ij}]^e &= \int_{V^e} [N_i]^T \rho [N_j] dV. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Матрица $[m_{ij}]^e$ известна как матрица масс элемента, а матрица ансамбля $[M]$ – как матрица масс системы. Матрица $[C]$ описывает вязкое демпфирование, $[N]$ – функции формы элемента, e – номер элемента. Для двумерных задач интегрирование производится по площади e -го элемента.

Если рассматривается динамическая задача без демпфирования ($[C]=0$), то собственные частоты колебаний пластины определяются из условия:

$$\det [K] - (2\pi f_n)^2 [M] = 0, \quad (2.3)$$

где f_n – n -я собственная частота.

Глобальная матрица жесткости системы $[K]$ определяется по формуле

$$[K_{ij}] = \int [B_i][D][B_j] dV, \quad (2.4)$$

где интегрирование ведется по всей области.

Матрица $[B]$ связывает обобщенные деформации по всей пластине $\{\varepsilon\}$ со степенями свободы в узлах $\{\delta\}$:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}, \quad (2.5)$$

а матрица $[D]$ – обобщенные напряжения $\{\sigma\}$ с обобщенными деформациями:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}. \quad (2.6)$$

Рассмотрим задачу об изгибе многослойной пластины (рис.2.1). Пластина состоит из n слоев transversально-изотропного материала постоянной для слоя, но различной для слоев толщины h_k ($k = 1, 2, \dots, n$).

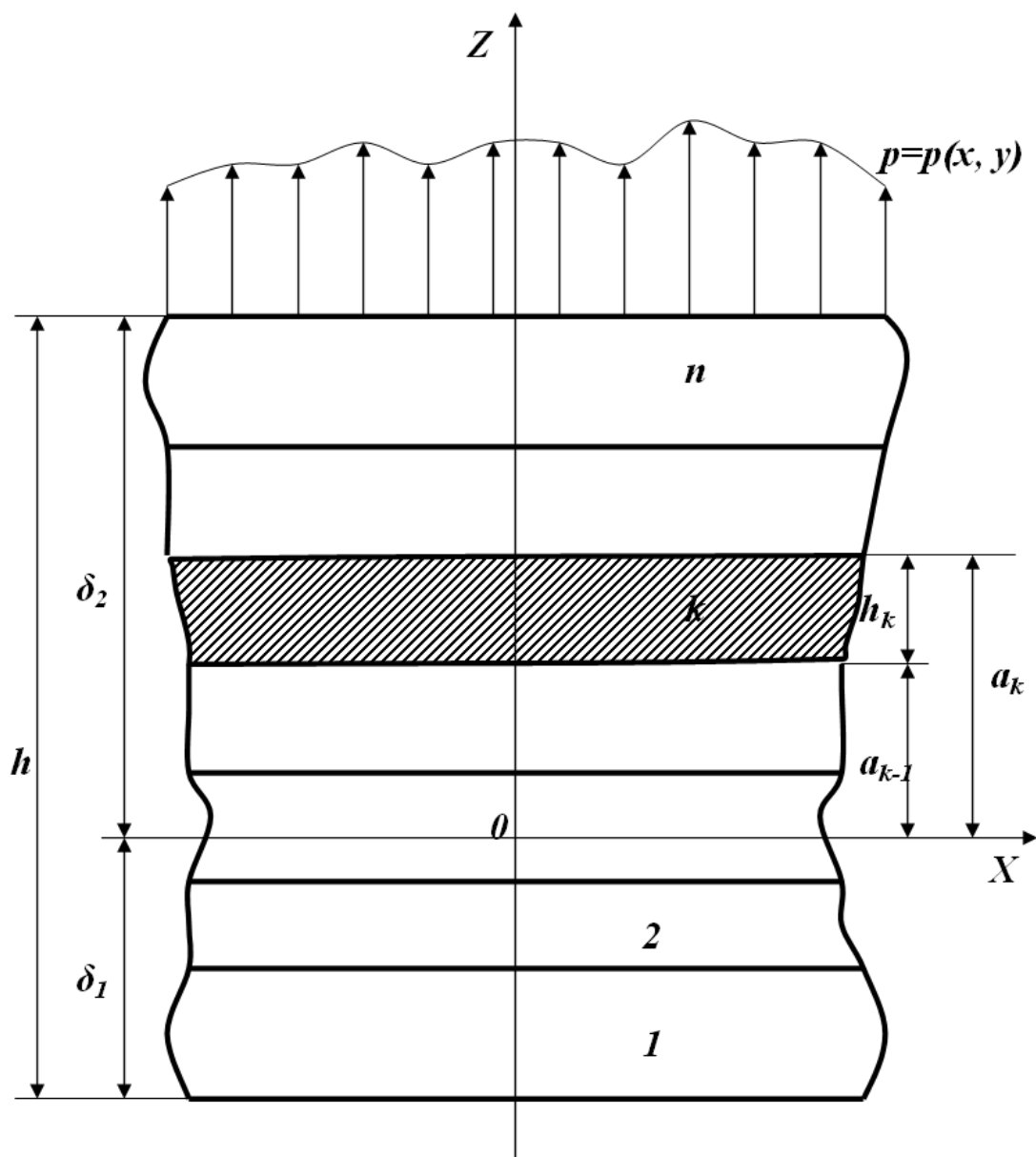


Рис. 2.1. Структура многослойной пластины

Плоскости изотропии параллельны наружным поверхностям. Слои несжимаемы и закон Гука для каждого из них имеет вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x^k &= \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} (\varepsilon_x^k + \mu_k \varepsilon_y^k); \sigma_y^k = \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} (\varepsilon_y^k + \mu_k \varepsilon_x^k); \\ \tau_{xy}^k &= \frac{E_k}{2(1 + \mu_k)} \varepsilon_{xy}^k; \tau_{xz}^k = G_k \gamma_{xz}^k; \tau_{yz}^k = G_k \gamma_{yz}^k,\end{aligned}\quad (2.7)$$

где $E_k = E_k(z)$, $\mu_k = \mu_k(z)$ – модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона в плоскости изотропии; $G_k = G_k(z)$ – модуль поперечного сдвига.

Примем следующие гипотезы:

- 1) внешняя нагрузка $p = p(x, y)$ направлена по нормали z к плоскости пластины xOy ;
- 2) слои работают совместно – без отрыва и проскальзывания;
- 3) материал каждого слоя подчиняется закону Гука в вышеприведенной форме, т.е. $\sigma_z^k = 0$;
- 4) нормальные перемещения постоянны по толщине пакета слоев: $w_k(x, y, z) = w(x, y)$;
- 5) тангенциальные перемещения координатной поверхности $z = 0$ пренебрежимо малы: $u(x, y) = 0$; $v(x, y) = 0$;
- 6) приняты во внимание деформации поперечного сдвига:

$$\gamma_{xz}^k = \frac{\partial \chi}{\partial x} \frac{d\psi_k(z)}{dz}; \gamma_{yz}^k = \frac{\partial \chi}{\partial y} \frac{d\psi_k(z)}{dz}, \quad (2.8)$$

где $\chi = \chi(x, y)$ – искомая функция сдвига, а $\psi_k(z) = \int_0^z \frac{1}{G_k} \left(\int_{-\delta_1}^z E_k z dz \right) dz$.

δ_1 – расстояние, определяющее положение координатной поверхности $z = 0$, для которого справедлива формула:

$$\delta_1 = \left(\sum_{k=1}^n \int_{c_{k-1}}^{c_k} E_k z_k dz_k \right) : \left(\sum_{k=1}^n \int_{c_{k-1}}^{c_k} E_k dz_k \right). \quad (2.9)$$

Здесь $z = z_k - \delta_1$, z_k отсчитывается от нижней поверхности пластины, c_k – расстояние от нижней поверхности пластины до верхней поверхности k -го слоя.

При расчете многослойных пластин методом конечных элементов в каждом узле вводятся 6 степеней свободы – 3 изгибных и 3 сдвиговых:

$$\{\delta_n\} = \begin{Bmatrix} w_n \\ \varphi_{x_n} \\ \varphi_{y_n} \end{Bmatrix}, \{\bar{\delta}_n\} = \begin{Bmatrix} \overline{w_n} \\ \overline{\varphi_{x_n}} \\ \overline{\varphi_{y_n}} \end{Bmatrix}, \quad (2.10)$$

где φ_x и φ_y – соответственно производные прогиба w по x и y – углы поворота нормали, а n – номер узла. Сдвиговый прогиб равен $\bar{w} = c_1 \chi$, где χ – искомая функция сдвига. Здесь

$$\begin{aligned} c_1 &= D_{12} / D_{11}; c_2 = D_{22} / D_{12}; \mu_{rs} = \overline{D_{rs}} / D_{rs}; \\ D_{rs} &= \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} \frac{E_k}{1 - \mu_k^2} F_{rk} F_{sk} dz; \\ \overline{D_{rs}} &= \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} \frac{E_k \mu_k}{1 - \mu_k^2} F_{rk} F_{sk} dz; \\ r, s &= 1, 2; F_{1k} = z; F_{2k} = -\psi_k(z). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Векторы обобщенных деформаций и напряжений запишем в виде:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \overline{\kappa_x} \\ \overline{\kappa_y} \\ \overline{\kappa_{xy}} \\ \varphi_x \\ \varphi_y \end{Bmatrix}; \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ \overline{M_x} \\ \overline{M_y} \\ \overline{M_{xy}} \\ Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix}, \quad (2.12)$$

где

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \kappa_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \kappa_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.13)$$

– кривизны изгиба в направлениях x , y и смешанная кривизна соответственно;

$$\overline{\kappa}_x = -\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial x^2}; \overline{\kappa}_y = -\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial y^2}; \overline{\kappa}_{xy} = -\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial x \partial y} \quad (2.14)$$

– кривизны сдвига – аналоги кривизны изгиба;

$$\overline{\varphi}_x = \frac{\partial \overline{w}}{\partial x}; \overline{\varphi}_y = \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} \quad (2.15)$$

– сдвиговые углы поворота – аналоги углов поворота нормали;

$$M_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_x^k z dz; M_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_y^k z dz; M_{xy} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xy}^k z dz \quad (2.16)$$

– изгибающие и крутящий моменты;

$$\overline{M}_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_x^k \psi_k(z) dz; \overline{M}_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_y^k \psi_k(z) dz; \overline{M}_{xy} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xy}^k \psi_k(z) dz \quad (2.17)$$

– обобщенные моменты высшего порядка – сдвиговые;

$$\overline{Q}_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xz}^k \frac{d\psi_k(z)}{dz} dz; \overline{Q}_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{yz}^k \frac{d\psi_k(z)}{dz} dz \quad (2.18)$$

– обобщенные поперечные силы высшего порядка.

Компоненты векторов напряжений и деформаций связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
M_x &= D_{11}[(\kappa_x + \mu_{11}\kappa_y) + (\overline{\kappa_x} + \mu_{12}\overline{\kappa_y})]; \\
M_y &= D_{11}[(\kappa_y + \mu_{11}\kappa_x) + (\overline{\kappa_y} + \mu_{12}\overline{\kappa_x})]; \\
M_{xy} &= 2D_{11}[(1 - \mu_{11})\kappa_{xy} + (1 - \mu_{12})\overline{\kappa_{xy}}]; \\
\overline{M_x} &= -D_{11}[c_1(\kappa_x + \mu_{12}\kappa_y) + c_2(\overline{\kappa_x} + \mu_{22}\overline{\kappa_y})]; \\
\overline{M_y} &= -D_{11}[c_1(\kappa_y + \mu_{12}\kappa_x) + c_2(\overline{\kappa_y} + \mu_{22}\overline{\kappa_x})]; \\
\overline{M_{xy}} &= -2D_{11}[c_1(1 - \mu_{12})\kappa_{xy} + c_2(1 - \mu_{22})\overline{\kappa_{xy}}]; \\
\overline{Q_x} &= D_{11}\overline{\phi_x}; \overline{Q_y} = D_{11}\overline{\phi_y}.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Отсюда получаем компоненты матрицы $[D]$.

2.1.2. Пример применения изложенной методики для расчета прогиба диафрагмы УЧЭ туннельного преобразователя под действием внешней нагрузки

Диафрагма чувствительного элемента туннельного преобразователя имеет форму правильного восьмиугольника и в определенных случаях может рассматриваться как тонкая слоистая пластина. Форма восьмиугольника была выбрана как допустимое удобством технологической реализации приближение к круглой форме диафрагмы. Помимо основного поликремниевого слоя (толщина может варьироваться от 1 до 3 мкм) имеется слой платиновой (или силицидной) металлизации толщиной 100 или 200 нм в зависимости от варианта изготовления с подслоем титана толщиной 50 нм. Прочие (кроме толщин) размеры должны быть подобраны после соответствующих расчетов исходя из требований, предъявляемых к конкретной модели преобразователя. Закрепление краев диафрагмы может быть как жестким, так и упругим – это зависит от отсутствия или наличия гофров.

Для того чтобы между иглой и электродом диафрагмы появился туннельный ток, необходимо подвести их друг к другу на туннельное

расстояние. Как уже было сказано выше, это осуществляется путем подачи разности потенциалов между диафрагмой и отклоняющим электродом, которые в совокупности друг с другом образуют плоский конденсатор емкости $c = \varepsilon_0 A / d$, где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, A – площадь диафрагмы, d – расстояние между диафрагмой и отклоняющими электродами. Если между диафрагмой и отклоняющим электродом приложить разность потенциалов V , то начальная интенсивность нагружения диафрагмы определится по формуле $q = \varepsilon_0 V^2 / 2d^2$.

Предложенный выше метод был использован для вычисления значений максимального статического прогиба диафрагмы УЧЭ под действием приложенной разности потенциалов в приближении малых прогибов (предполагая, что электростатическая нагрузка не изменяется при изменении межэлектродного зазора), а также для расчета частоты основного тона ее собственных колебаний. На рис.2.2 изображена диафрагма УЧЭ, покрытая конечноэлементной сеткой.

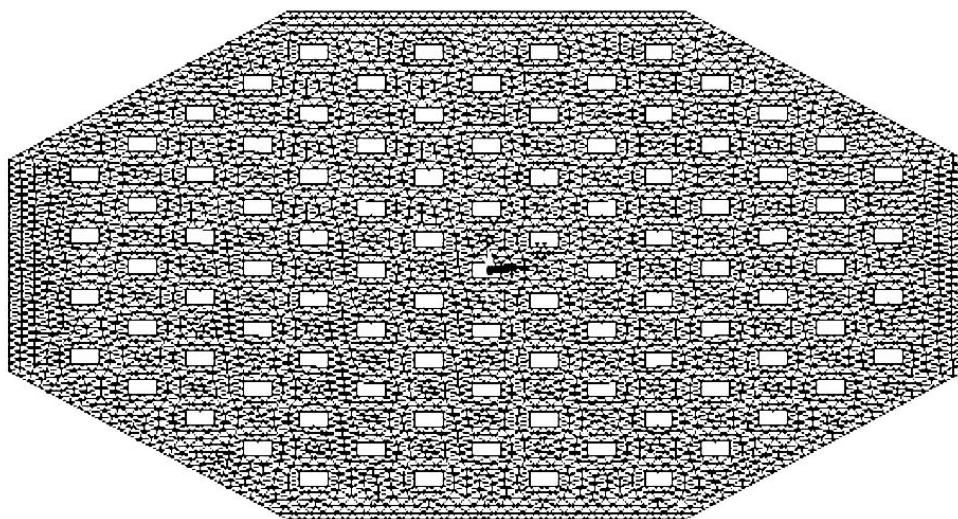


Рис. 2.2. Конечноэлементное разбиение диафрагмы чувствительного элемента

Поперечный размер диафрагмы в рассматриваемом случае составлял 2000 мкм, толщины слоев платины, титана и кремния – соответственно $h_{Pt} = 200$ нм, $h_{Ti} = 50$ нм, $h_{Si} = 1$ мкм. Модули Юнга и коэффициенты Пуассона для поликремния, титана и платины были приняты равными соответственно $E_{Si} = 140$ ГПа, $\nu_{Si} = 0,32$, $E_{Ti} = 130$ ГПа, $\nu_{Ti} = 0,32$ и $E_{Pt} = 160$ ГПа, $\nu_{Pt} = 0,32$. Края диафрагмы жестко закреплены. При проведении численных расчетов на ЭВМ был использован конечноэлементный программный пакет ANSYS.

Для сравнения были проведены аналитические расчеты тех же параметров для тонкой круглой кремниевой пластинки радиуса 1000 мкм и толщины 1 мкм с жестко закрепленными краями. В случае равномерного нагружения с интенсивностью q круглой пластинки уравнение, описывающее прогиб w , выглядит так [67]:

$$\frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{qr}{2D}, \quad (2.20)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость, E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластинки, h – ее толщина. В случае приложения нагрузки, равной, как и раньше, $q = \varepsilon_0 V^2 / 2d^2$, максимальный прогиб (наблюдаемый в центре пластинки) будет равен:

$$w_{\max} = \frac{\varepsilon_0 V^2 R^4}{128d^2 D}. \quad (2.21)$$

Для вычисления собственных частот колебаний такой пластинки необходимо решить уравнение

$$\Delta \Delta w = -a^2 w_{tt}, \quad (2.22)$$

где $a^2 = \frac{\rho h}{D}$, ρ – плотность кремния, равная $2,33 \cdot 10^3$ кг/м³. Для диафрагмы с заземленными краями получим следующее выражение для резонансных частот (см. [68] или [69]):

$$p_{mn} = \frac{x_{mn}^2 h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (2.23)$$

где x_{mn} – m -й корень уравнения $\frac{J_n(x)}{J_n'(x)} = \frac{I_n(x)}{I_n'(x)}$. Здесь $J_n(x)$ и $I_n(x)$ – соответственно обыкновенная и модифицированная функции Бесселя порядка n .

Для круглой кремниевой диафрагмы радиуса $R = 1000$ мкм и толщины $h = 1$ мкм вычисленная таким образом частота основного тона $f_0 = p_{10} = 3067$ Гц.

Частота основного тона для восьмиугольной двухслойной диафрагмы (параметры приведены выше), вычисленная методом конечных элементов, составила $f_{0\text{МКЭ}} = 3050$ Гц.

Табл.2.1 показывает зависимость максимального прогиба диафрагмы от приложенного напряжения при различных начальных расстояниях d между диафрагмой и отклоняющим электродом.

Таблица 2.1

Зависимость максимального прогиба диафрагмы от приложенного напряжения при различных начальных расстояниях d между диафрагмой и отклоняющим электродом

$V (d=1.5 \text{ мкм}),$ В	$V (d=3 \text{ мкм}),$ В	$V (d=6 \text{ мкм}),$ В	$w1_{\text{max}}$ мкм	$w2_{\text{max}}$ мкм
0.1	0.2	0,4	0,02	0,019
0,2	0,4	0,8	0,09	0,074
0,25	0,5	1,0	0,15	0,115
0,3	0,6	1,2	0,21	0,165
0,35	0,7	1,4	0,29	0,224

$w1_{\max}$ – значение максимального прогиба, вычисленное по формуле (2.21) для круглой кремниевой пластины.

$w2_{\max}$ – значение максимального прогиба, вычисленное для восьмиугольной трехслойной (Si-Ti-Pt) диафрагмы методом конечных элементов.

Параметры диафрагм приведены выше.

Незначительное отличие результатов конечноэлементного и аналитического расчетов обусловлено тем, что поперечные размеры рассчитываемых диафрагм гораздо больше их толщин, а также незначительной разницей между принятыми значениями модулей Юнга кремния и платины. На практике существует необходимость в экспериментальном определении упругих констант материалов МЭМС [71, 72]. Это обусловлено тем, что упругие механические константы, такие как модуль упругости и коэффициент Пуассона поликремниевых пленок, используемых при изготовлении широкого спектра МЭМС (в частности, и туннельных преобразователей) находятся в тесной зависимости от технологического маршрута, выполняемого при изготовлении изделия [3, 73÷75].

Следует также отметить, что в реальной диафрагме туннельного преобразователя (как и любого другого преобразователя, изготовленного по технологии МЭМС) проделываются периодические отверстия (показаны на рис.2.2), необходимые для вытравливания т.н. «жертвенного слоя» на конечных этапах технологии изготовления изделия. В одном из вариантов изготовления устройства они имеют размер 5×5 мкм и располагаются в шахматном порядке с шагом 20 мкм. При моделировании напряженно-деформированного состояния подвижных элементов МЭМС целесообразно учитывать их влияние. Однако, если их размеры намного меньше размеров задачи, это затруднительно сделать путем сгущения конечноэлементной сетки из-за ограниченности вычислительных ресурсов

существующих ЭВМ. Эта задача может быть решена при помощи методов осреднения, использующихся в механике композиционных материалов [76].

2.2. Анализ эффекта схлопывания электродов (pull-in instability) электростатического актюатора УЧЭ туннельного преобразователя

Эффект неконтролируемого схлопывания электродов (pull-in instability) имеет место практически во всех видах микроэлектромеханических актюаторов с электростатическим управлением, накладывая ощутимые ограничения на характеристики МЭМС- и НЭМС-устройств. Впервые исследованием этого явления занялся английский ученый Тейлор, поставив в конце 1960-х годов ряд экспериментов по слиянию капель электропроводящей жидкости (расположенных достаточно близко друг от друга) под действием приложенной к ним разности электрических потенциалов [77]. Как только разность потенциалов достигала некоторого порогового значения, капли сливались друг с другом, несмотря на то, что между ними оставался еще достаточный запас расстояния. В работе [78] была разработана математическая модель этих экспериментов в приближении малого аспектного соотношения. Задача была сведена к нелинейному обыкновенному дифференциальному уравнению, описывающему поведение диафрагмы. Полученное уравнение было решено численно.

Примерно в это же время был создан первый кремниевый микромеханический прибор – транзистор с резонансным затвором, в котором наблюдался этот же эффект [79, 80]. Прибор включал в себя металлизированную консольную балку, нависающую над канальной областью МОП-транзистора. В указанных работах было проанализировано

его поведение при различных значениях отклоняющего напряжения и впервые введен термин «pull-in instability». Эксперимент и расчеты показали, что как только конец балки переместится приблизительно на треть своего пути к отклоняющему электроду, положение балки станет неустойчивым, и она самопроизвольно переместится на остальное расстояние в результате быстрого возрастания электростатических сил на ее конце. Для расчетов использовалась модель простейшей электромеханической системы (mass spring model) (рис.2.3).

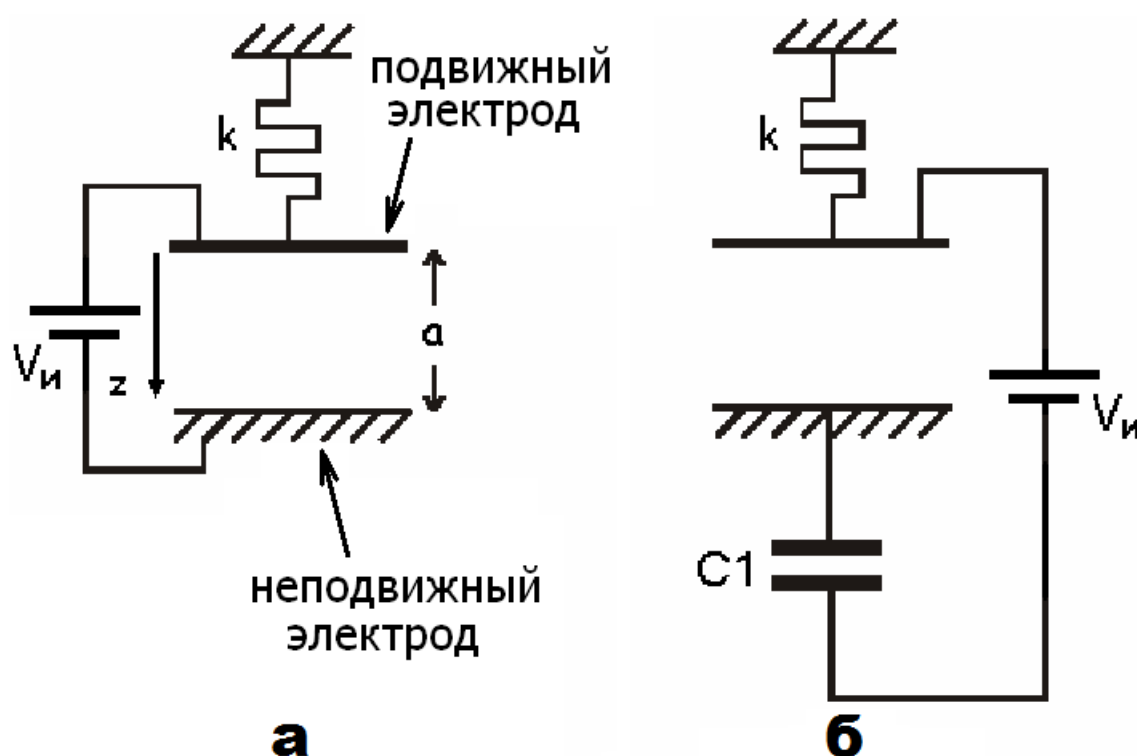


Рис. 2.3. Схема простейшей электромеханической модели (пластина на упругом подвесе) для анализа электростатического схлопывания:

а – приложение управляющего напряжения непосредственно к электродам;

б – приложение управляющего напряжения через последовательно включенный конденсатор

С тех пор было разработано и создано множество микромеханических устройств различного назначения. В большинстве из них для управления движением упругого элемента используется электрическое поле (как и в рассматриваемых туннельных преобразователях). При проектировании туннельных преобразователей требуется учет описанного эффекта схлопывания для разных вариантов преобразователя и, если необходимо, предложение методик борьбы с его влиянием. Это было сделано на основе подходов, описанных в работах [78÷94, 111÷113].

В данном разделе описаны эффект схлопывания электродов и методы его подавления в планарных микро- и наномеханических системах. Указывается на необходимость учета казимировского взаимодействия, наблюдающегося на субмикронных и нанометровых расстояниях между электродами. Рассматриваются описания актюаторов с использованием нескольких типов моделей – пластина на упругом подвесе, круглая диафрагма, тонкие пластины произвольной геометрии. Описанные методы и соотношения могут быть использованы для расчета и оптимизации параметров упругого элемента диафрагменного типа, применяемого в туннельном преобразователе.

2.2.1. Простейшая модель упругого элемента – пластина на упругом подвесе

Эта простейшая электромеханическая модель (рис.2.3,а), пригодная для описания эффекта электростатического схлопывания в ряде устройств, использовалась при расчете транзистора с резонансным затвором [79, 80]. Предполагается, что на подвижный электрод действуют следующие силы: сила упругости пружины $F_{уп} = -kw$, сила электростатического

притяжения $F_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S V^2}{2(a-w)^2}$ и внешняя сила $F_{\text{вн}} = pS$. Здесь k – жесткость упругого подвеса, ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, a – начальное расстояние между подвижным и неподвижным электродами, S – площадь электрода, V – прикладываемое напряжение, p – внешнее давление. В случае, иллюстрируемом рис.2.3,а, $V=V_{\text{н}}$. Уравнение равновесия имеет следующий вид:

$$kw = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S V^2}{2(a-w)^2} + pS. \quad (2.24)$$

Переходя к безразмерным переменным

$$W = w/a, \quad \beta = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S V_{\text{н}}^2}{2ka^3}, \quad P = \frac{pS}{ka}, \quad \text{получим:}$$

$$(W - P)(1 - W)^2 = \beta. \quad (2.25)$$

В работе [92] величина β названа «приведенным напряжением». Анализируя последнее уравнение, можно убедиться, что для описанной системы при $P = 0$ расстояние, пройденное подвижным электродом до точки схлопывания, $w_{\text{кр}} = a/3$ или $W_{\text{кр}} = 1/3$ [79, 80, 92]. Этому расстоянию соответствует критическое значение напряжения $V_{\text{кр}} = 0.183 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{ka^3}{\varepsilon S}}$. На рис. 2.4 изображены графики зависимости относительного отклонения W от «приведенного напряжения» β , построенные по формуле (2.25) для разных значений P . Для случая $P=0$ обозначены критические значения $W_{\text{кр}}$ и $\beta_{\text{кр}}$.

Как видно из рис. 2.4, равновесие возможно как при $W < W_{\text{кр}}$, так и при $W > W_{\text{кр}}$, то есть одному значению β могут соответствовать два

состояния системы. Однако для случая $W > W_{кр}$ равновесие является неустойчивым, и любые флуктуации в сторону увеличения смещения способны вывести систему из равновесия и привести к схлопыванию электродов [83].

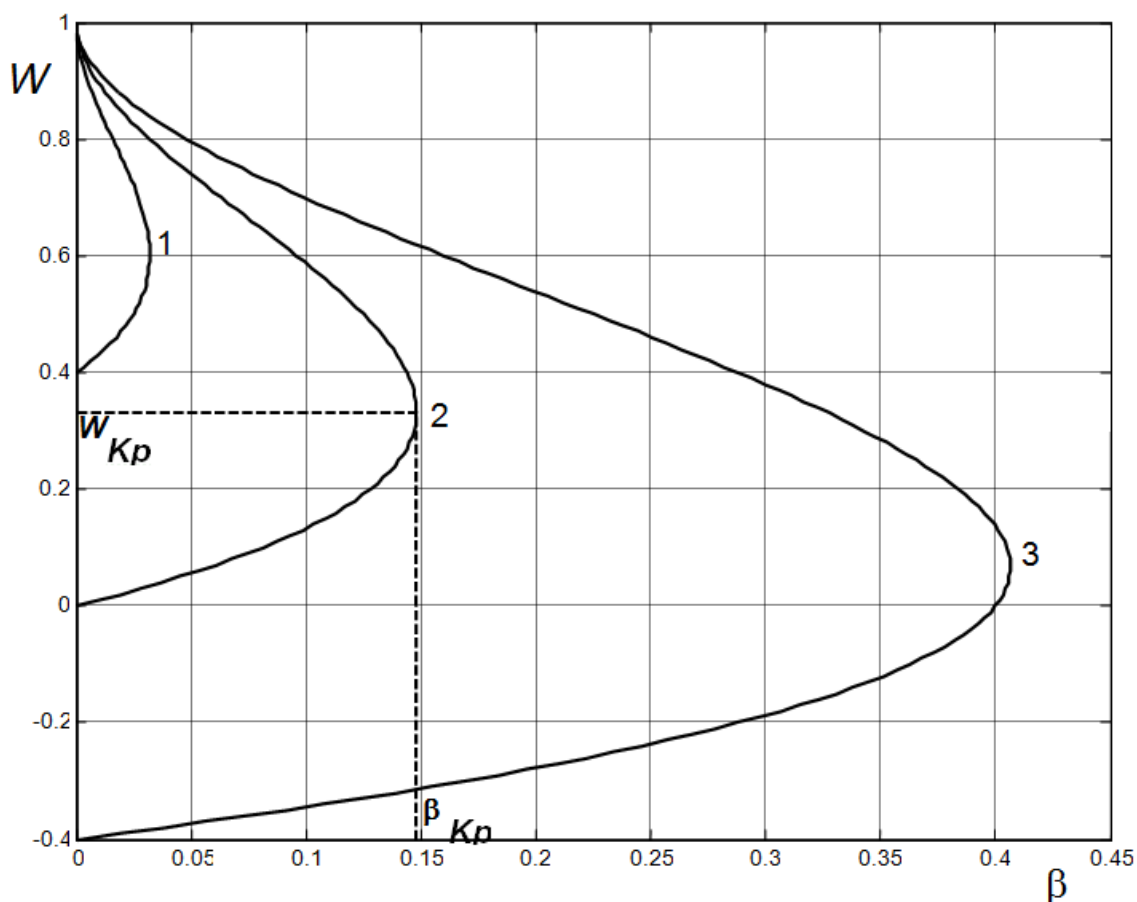


Рис. 2.4. Зависимость относительного отклонения W от «приведенного напряжения» β для пластины на упругом подвесе в случае приложения управляющего напряжения непосредственно к электродам при:

- 1 – $P = 0,4$;
- 2 – $P = 0$;
- 3 – $P = -0,4$

Для увеличения значения $W_{кр}$ и, следовательно, сведения к возможному минимуму влияния эффекта неконтролируемого электростатического притяжения существует ряд методов. Так, для этого предлагались специальные конструкции как упругих подвесов [86], так и всего электромеханического узла, обеспечивающего движение упругого элемента под действием электростатических сил [88,91], предлагалось также использование петли обратной связи [87].

Однако самым простым и удачным с точки зрения технологической реализации методом оказалось последовательное включение в цепь конденсатора [89÷91] или варикапа [89,93] (на рис. 2.3,б обозначен как $C1$).

В случае использования последовательно включенного конденсатора управляющее напряжение V между подвижным и неподвижным электродами можно определить по формуле

$$V = \frac{V_{II}}{1 + \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{(a - w) C1}}. \quad (2.26)$$

А уравнение (2.25) преобразуется к виду:

$$(W - P)(1 - W + \chi)^2 = \beta, \quad (2.27)$$

где $\chi = \frac{C_0}{C1}$, а $C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{a}$ – начальная емкость устройства.

Графики зависимостей W от β для разных значений χ и P приведены соответственно на рис.2.5. Видно, что при использовании в устройстве конденсатора емкостью $C1 = \frac{C_0}{2}$ возможно устойчивое отклонение подвижного электрода на всю величину начального межэлектродного зазора при $P = 0$. Приложение положительной внешней нагрузки P тоже

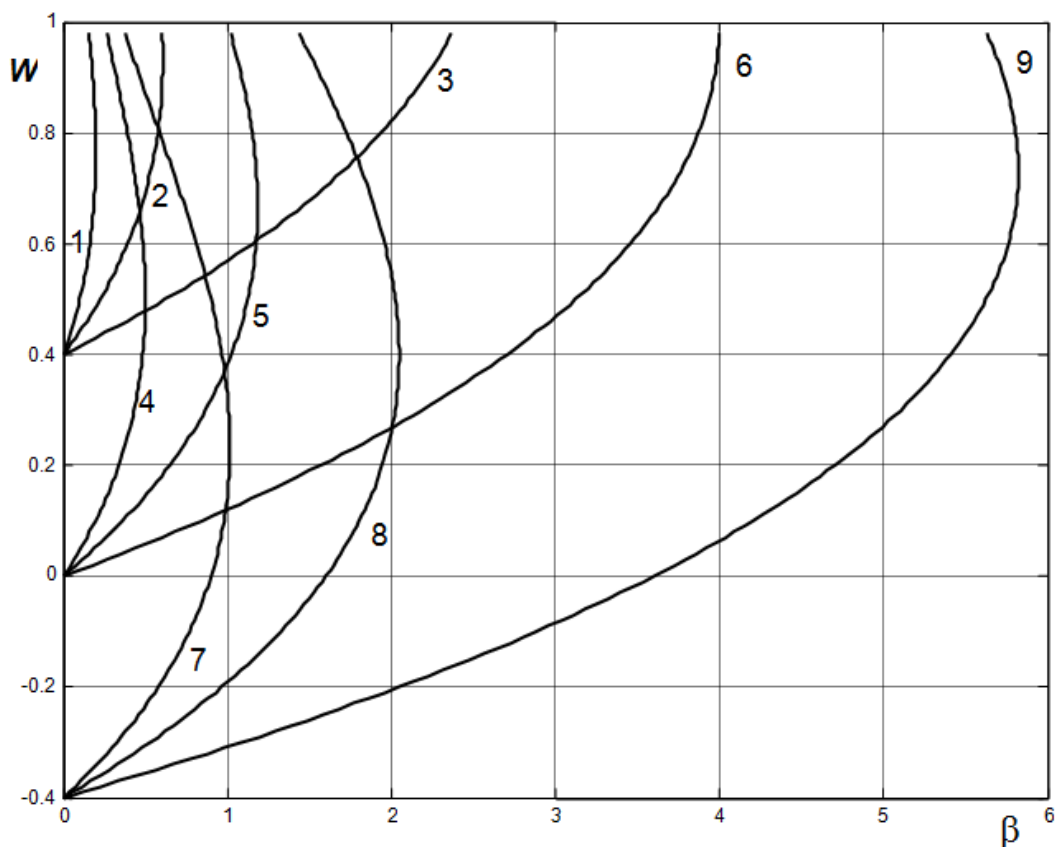


Рис. 2.5. Зависимости W от β для пластины на упругом подвесе при $P = 0$ в случае приложения управляющего напряжения через последовательно включенный конденсатор для разных значений χ и P :

1, 4, 7 – $\chi=0.5$ соответственно при $P = 0.4$, $P = 0$ и $P = -0.4$;

2, 5, 8 – $\chi=1$ соответственно при $P = 0.4$, $P = 0$ и $P = -0.4$;

3, 6, 9 – $\chi=2$ соответственно при $P = 0.4$, $P = 0$ и $P = -0.4$

частично подавляет эффект неконтролируемого электростатического притяжения.

Вместо конденсатора для борьбы с эффектом схлопывания возможно также использовать полупроводниковый варикап [89], емкость C_B которого находится в следующей зависимости от прикладываемого к нему напряжения V_B [95]:

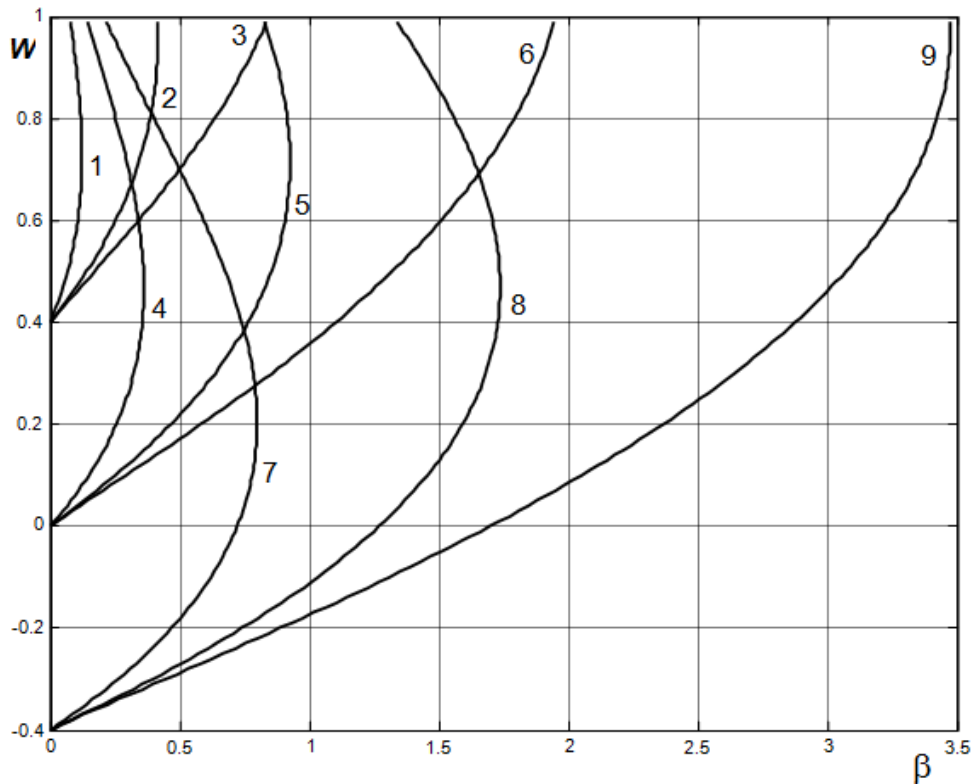


Рис. 2.6. Зависимости W от β для пластины на упругом подвесе при $P = 0$ в случае приложения управляющего напряжения через последовательно включенный варикап:

при $P = 0,4$: 1: $\chi_1 = 0,3$, $\Phi_k = 0,5$; 2: $\chi_1 = 0,6$, $\Phi_k = 0,5$;

3: $\chi_1 = 0,6$, $\Phi_k = 0,1$;

при $P = 0$: 4: $\chi_1 = 0,3$, $\Phi_k = 0,5$; 5: $\chi_1 = 0,6$, $\Phi_k = 0,5$; 6: $\chi_1 = 0,6$, $\Phi_k = 0,1$;

при $P = -0,4$: 7: $\chi_1 = 0,3$, $\Phi_k = 0,5$; 8: $\chi_1 = 0,6$, $\Phi_k = 0,5$;

9: $\chi_1 = 0,6$, $\Phi_k = 0,1$

$$C_B = C_H \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{V_B}{\varphi_K}}}, \quad (2.28)$$

где φ_k – контактная разность потенциалов, а C_H – емкость варикапа при нулевом напряжении.

В этом случае W и β удовлетворяют более сложному уравнению:

$$\chi_1 \sqrt{(W-P) + \frac{(W-P)}{\sqrt{\Phi_k}} (\sqrt{\beta} - \sqrt{(W-P)(1-W)^2}) - \sqrt{\beta} + \sqrt{(W-P)(1-W)^2}} = 0 \quad (2.29)$$

Здесь $\chi_1 = \frac{C_0}{C_H}$, $\Phi_k = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{2ka^3} \varphi_k^2$.

Последнее уравнение было решено численно. Графики зависимостей W от β для разных значений χ_1 , Φ_k и P изображены на рис. 2.6.

Из рисунка видно, что использование варикапа также позволяет добиться увеличения диапазона устойчивого отклонения подвижного электрода. При этом прикладываемые напряжения меньше, чем в случае применения конденсатора фиксированной емкости. Уменьшение Φ_k в некоторых случаях позволяет приблизить зависимость W от β к линейной.

2.2.2. Упругий элемент – диафрагма конечной толщины и произвольной геометрии

Материалы, из которых выполняется основной несущий слой диафрагм микроэлектромеханических устройств, могут быть различными – поликремний, SiO_2 , Si_3N_4 , кремний, легированный бором [1÷3,12]. Основным требованием, предъявляемым к диафрагмам, является наличие растягивающих усилий в их срединной плоскости. В противном случае подобные упругие элементы имеют тенденцию к прогибу, сморщиванию и в конечном итоге к разрушению.

При выборе математической модели, описывающей упругий элемент диафрагменного типа, ключевой является величина отношения h/l , где h – толщина диафрагмы, l – ее размер.

Если при описании поведения упругого элемента диафрагменного типа нельзя пренебречь изгибной жесткостью (что бывает при

рассмотрении диафрагм конечной толщины), и, наряду с этим, диафрагма имеет сложную форму, аналитическое описание такого упругого элемента становится невозможным. Как правило, в большинстве случаев для этого используют методы конечных или граничных элементов [66,70,96], при помощи которых можно с высокой точностью моделировать поведение конкретной конструкции. Однако на начальном этапе проектирования часто бывает целесообразным воспользоваться приближенными методами расчета, дающими ответ в аналитической форме и позволяющими оценить поведение конструкции с приемлемой точностью. В [81÷84] описано применение вариационных энергетических методов к расчету микроэлектромеханических упругих диафрагменных элементов различной геометрии.

Принцип виртуальных перемещений дает уравнение [67]:

$$\delta V_{\text{деф}} - \delta \iint p(x, y) w(x, y) dx dy = 0, \quad (2.30)$$

где

$$\begin{aligned} V_{\text{деф}} = & \frac{Eh^3}{24(1-\mu^2)} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - 2(1-\mu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy + \\ & + \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \iint \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]^2 + \right. \\ & + 2\mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{1-\mu}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ & \left. \left. + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] \right\} dx dy + \frac{T_0}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \quad (2.31) \end{aligned}$$

– энергия деформации диафрагмы, состоящая из изгибной и мембранной частей, $w(x, y)$ – прогиб диафрагмы под действием нагрузки $p(x, y)$, E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала диафрагмы, h – ее толщина, T_0 – начальное натяжение диафрагмы

(предполагается однородным). Интегрирование ведется по площади диафрагмы. Выражение (2.31) для энергии деформации соответствует случаю больших прогибов пластинки, подвергнутой предварительному однородному растяжению в плоскости (x, y) .

Применяя энергетический метод, необходимо в каждом частном случае принять надлежащие выражения для смещений u , v и w . Эти выражения должны удовлетворять граничным условиям и содержать несколько произвольных параметров, значения которых подлежат определению методом виртуальных перемещений.

2.2.3. Особенности функционирования электростатических актюаторов с субмикронным межэлектродным зазором. Расчет отклонения диафрагменного актюатора под действием электрического поля

Развитие планарной технологии предусматривает дальнейшую миниатюризацию производящихся в соответствии с ней устройств, в том числе и микроэлектромеханических. При достижении элементами МЭМС субмикронных и нанометровых размеров, ощутимое влияние на их работу начнут оказывать силовые взаимодействия, слабо проявляющиеся на «больших» расстояниях в единицы микрон, характерных для сегодняшних микроэлектромеханических устройств. К этим силам могут быть отнесены силы Ван-дер-Ваальса и Казимира, которые являются основными учитываемыми взаимодействиями в некоторых режимах атомно-силовой микроскопии [23, 24]. Они также должны быть приняты во внимание при расчете МЭМС с элементами, разнесенными друг от друга на субмикронные расстояния, если же расстояния между элементами уменьшатся до единиц или десятков нанометров (в НЭМС), эти силы

будут полностью определять работу прибора. В частности, казимировское взаимодействие начинает оказывать ощутимое влияние на функционирование некоторых актюаторов диафрагменного типа уже при достижении межэлектродным зазором величины около 0,5 мкм [97, 98, 110]. Силы Ван-дер-Ваальса менее дальнodelствующиe и проявляются на расстояниях, меньших характерной длины волны спектра поглощения [23]. Эффект Казимира выражается в том, что на единицу площади двух проводящих плоскопараллельных пластин действует сила притяжения

$$F_c = \frac{\gamma \hbar c \pi^2}{240 a^4}, \quad (2.32)$$

где c – скорость света в вакууме, $\hbar$ – постоянная Планка, a – расстояние между пластинами, $\gamma \leq 1$ – коэффициент, зависящий от диэлектрической проницаемости пластин и среды между ними (для сверхпроводящих пластин в вакууме $\gamma = 1$). Эффект может быть объяснен изменением спектра нулевых колебаний из-за обращения в нуль тангенциальной составляющей электрического поля на пластинах [99]. Вид формулы (2.32) может меняться в зависимости от формы взаимодействующих тел.

Рассмотрим электростатический актюатор, описываемый простейшей электромеханической моделью с одной степенью свободы (рис.2.3). С учетом эффекта Казимира уравнение (2.29), описывающее случай применения вариакa для увеличения диапазона хода подвижного электрода, примет вид:

$$\sqrt{W-P-\frac{\alpha}{(1-W)^4}} \left\{ 1-W+\chi_1 \sqrt{1+\frac{\left(\sqrt{\beta}-\sqrt{\left(W-P-\frac{\alpha}{(1-W)^4} \right) (1-W)^2} \right)}{\sqrt{\Phi_k}}} \right\} - \sqrt{\beta} = 0. \quad (2.33)$$

Здесь $\alpha = \frac{\gamma \pi^2 \hbar c S}{240 k a^5}$.

Положив $\Phi_k = \infty$ и заменив χ_1 на χ , придем к уравнению для случая использования конденсатора фиксированной емкости, которое при $\chi = 0$ описывает случай приложения отклоняющего напряжения непосредственно к электродам.

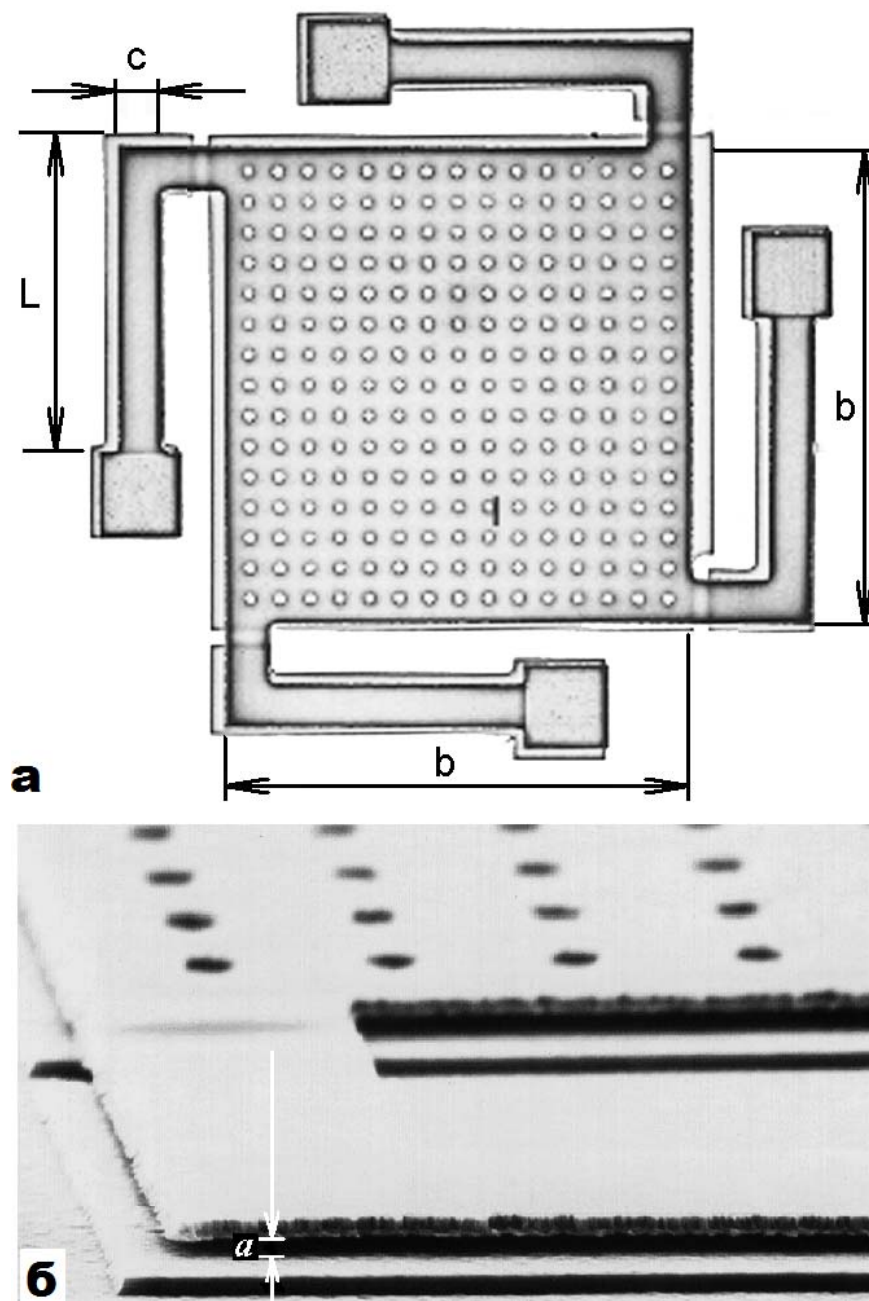


Рис. 2.3. Вариант электростатического актюатора – пластина, подвешенная на 4-х консольных балках

При помощи полученных соотношений был рассчитан диапазон устойчивого отклонения изображенного на рис.2.7 упругого поликремниевого элемента и подобраны параметры конденсатора и варикапа, предназначенных для расширения этого диапазона. Упругий элемент представляет собой электростатически отклоняемую квадратную пластину, подвешенную на четырех консольных балках (кантилеверах). Микромеханические кантилеверы широко используются в задачах атомно-силовой микроскопии [100, 101], поэтому хорошо известна зависимость их жесткости от конструктивно-технологических параметров. Обычно коэффициент жесткости изменяется в диапазоне 0,01-50 Н/м [101]. Его величину для прямоугольного кантилевера можно определить по формуле:

$$k_K = \frac{Eh^3C}{4L^3}, \quad (2.34)$$

где h , C и L – соответственно толщина, ширина и длина кантилевера, а E – модуль Юнга материала. Для поликристаллического кремния модуль Юнга составляет $E \approx 160$ ГПа [102]. Диафрагма чувствительного элемента туннельного преобразователя имеет форму правильного восьмиугольника.

Для поликремниевого кантилевера с размерами $L=250$ мкм, $C = 30$ мкм, $h = 1$ мкм коэффициент жесткости составит $k_K = 0,07$ Н/м, а суммарная жесткость подвеса $k = 4k_K = 0,3$ Н/м. Если $b = 400$ мкм, то площадь электрода $S = b^2 = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$.

Пусть начальное расстояние между нижним и верхним электродами $a = 1$ мкм, а внешнее давление $P = 0$. Начальная емкость рассматриваемого устройства $C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{a} = 1,41 \text{ пФ}$. Для расширения диапазона движения подвижного электрода целесообразно использовать конденсатор емкостью $C_1 = \frac{C_0}{2} = 0,7 \text{ пФ}$. Для этой цели можно также использовать варикап с начальной емкостью $C_H = 0,89 \text{ пФ}$ и контактной разностью потенциалов

$\varphi_k=0,25\text{В}$. Приведенная контактная разность потенциалов составит $\Phi_k=0,15$, а $\chi_1=0,63$. На рис.2.8 представлены зависимости величины отклонения подвижного электрода w от приложенного напряжения $V_{\text{и}}$ для изображенного на рис.2.7 устройства при использовании упомянутых конденсатора и варикапа с учетом и без учета казимировского взаимодействия (принимается $\gamma=1$, $P=0$).

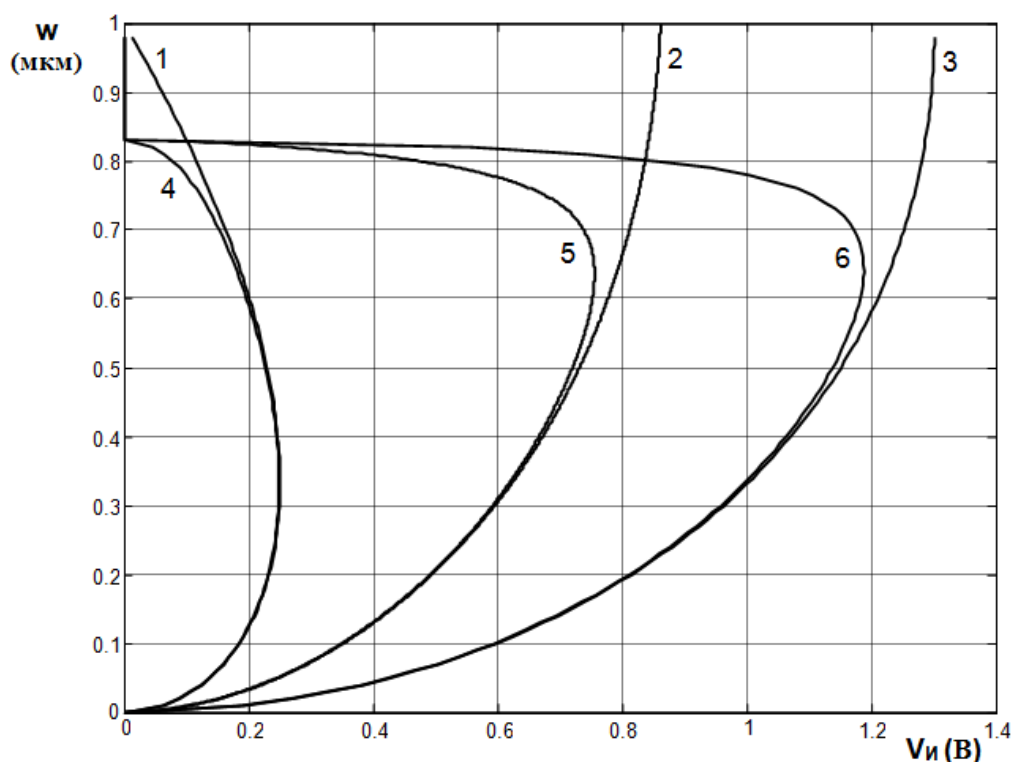


Рис. 2.8. Зависимости отклонения подвижного электрода w от управляющего напряжения $V_{\text{и}}$ для изображенного на рис.2.7 устройства соответственно без учета и с учетом казимировского взаимодействия:

- 1, 4 – приложение управляющего напряжения непосредственно к электродам;
- 2, 5 – использование варикапа ($\chi_1=0,63$, $\varphi_k = 0,25 \text{ В}$);
- 3, 6 – использование конденсатора ($\chi=2$)

Из рисунка видно, что в рассмотренном устройстве из-за действия казимировских сил невозможно добиться устойчивого отклонения подвижного электрода на всю величину зазора путем использования конденсатора или варикапа. Казимировское взаимодействие начинает оказывать существенное влияние на работу прибора при величине зазора около 0,5 мкм.

Еще одним примером микроэлектромеханического устройства, при расчете которого должно быть учтено казимировское взаимодействие, может служить электростатический актюатор диафрагменного типа, изображенный на рис.2.9. Используемая в приборе поликремниевая диафрагма, имеющая форму правильного восьмиугольника, подвешена над отклоняющим электродом на расстоянии порядка одного или нескольких микрон.

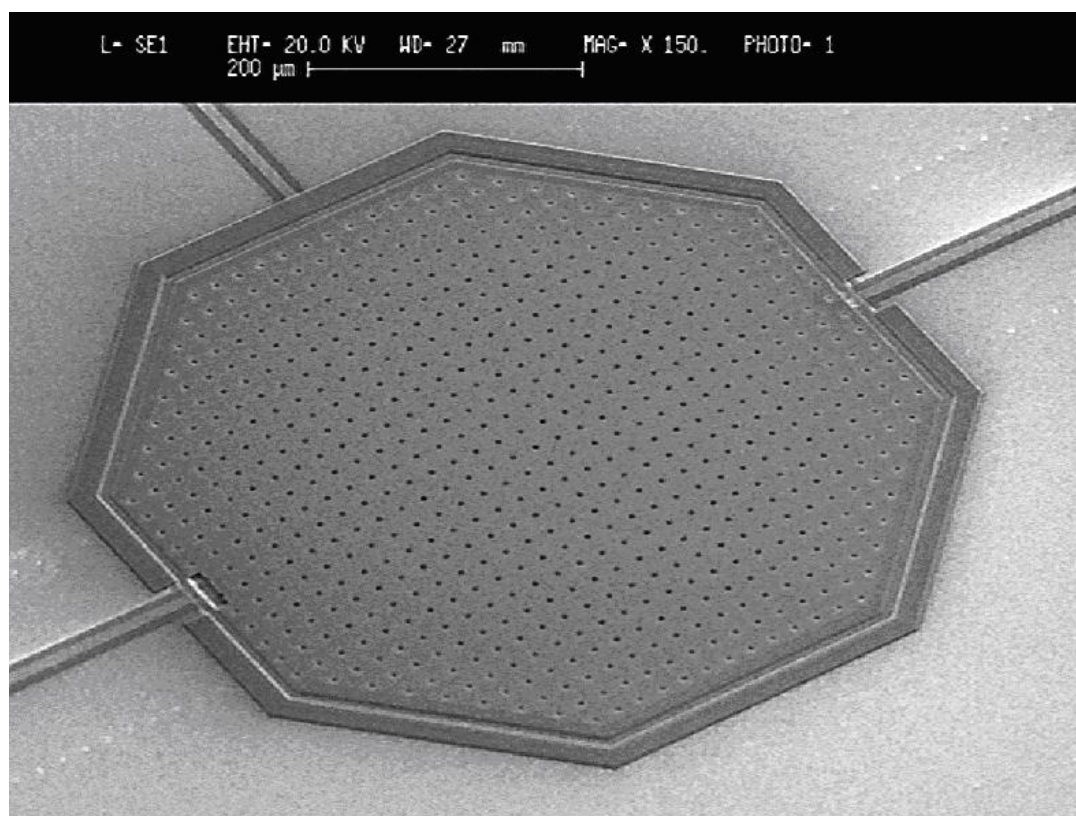


Рис. 2.9. Электростатический актюатор диафрагменного типа

Для расчета отклонения такой диафрагмы под действием внешних сил можно воспользоваться вышеупомянутым энергетическим методом. Выберем пробные функции перемещений вдоль координатных осей в следующем виде:

$$w = w_0 \left((y - 0.7D)^2 - x^2 \right)^2 \left((y + 0.7D)^2 - x^2 \right)^2 \left(x^2 - 0.25D^2 \right)^2 \left(y^2 - 0.25D^2 \right)^2, \quad (2.35)$$

$$u = u_0 x \left((y - 0.7D)^2 - x^2 \right)^4 \left((y + 0.7D)^2 - x^2 \right)^4 \left(x^2 - 0.25D^2 \right)^2 \left(y^2 - 0.25D^2 \right)^4, \quad (2.36)$$

$$v = u_0 y \left((y - 0.7D)^2 - x^2 \right)^4 \left((y + 0.7D)^2 - x^2 \right)^4 \left(x^2 - 0.25D^2 \right)^4 \left(y^2 - 0.25D^2 \right)^2, \quad (2.37)$$

где D – размер диафрагмы (см. рис.10), ν – коэффициент Пуассона материала, w_0 , u_0 – варьируемые параметры. Справедливы следующие соотношения:

$$\frac{\partial V_{\text{деф}}}{\partial w_0} \delta w_0 = \delta \iint p(x, y) w(x, y) dx dy, \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial V_{\text{деф}}}{\partial u_0} = 0, \quad (2.39)$$

из которых возможно найти w_0 и u_0 . Энергия деформации $V_{\text{деф}}$ определяется в соответствии с (2.31). Интегрирование ведется по площади диафрагмы.

Нагрузка, действующая на диафрагму, в нашем случае равна (учитываются внешнее давление, электростатические и казимировские силы):

$$p(x, y) = p_{\text{вн}} + \frac{\epsilon \epsilon_0 V^2}{2(a - w(x, y))^2} + \frac{\gamma \hbar c \pi^2}{240(a - w(x, y))^4} \quad (2.40)$$

V – напряжение между диафрагмой и отклоняющим электродом. В случае приложения управляющего напряжения $V_{\text{н}}$ непосредственно к обкладкам $V = V_{\text{н}}$. При использовании конденсатора и варикапа верны соотношения:

$$\text{для конденсатора: } V_H = V \left(1 + \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \iint \frac{dx dy}{a - w(x, y)}}{C1} \right), \quad (2.41)$$

$$\text{для варикапа: } V_H = V \left(1 + \sqrt{1 + \frac{V_H - V}{\varphi_k} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \iint \frac{dx dy}{a - w(x, y)}}{C_H}} \right). \quad (2.42)$$

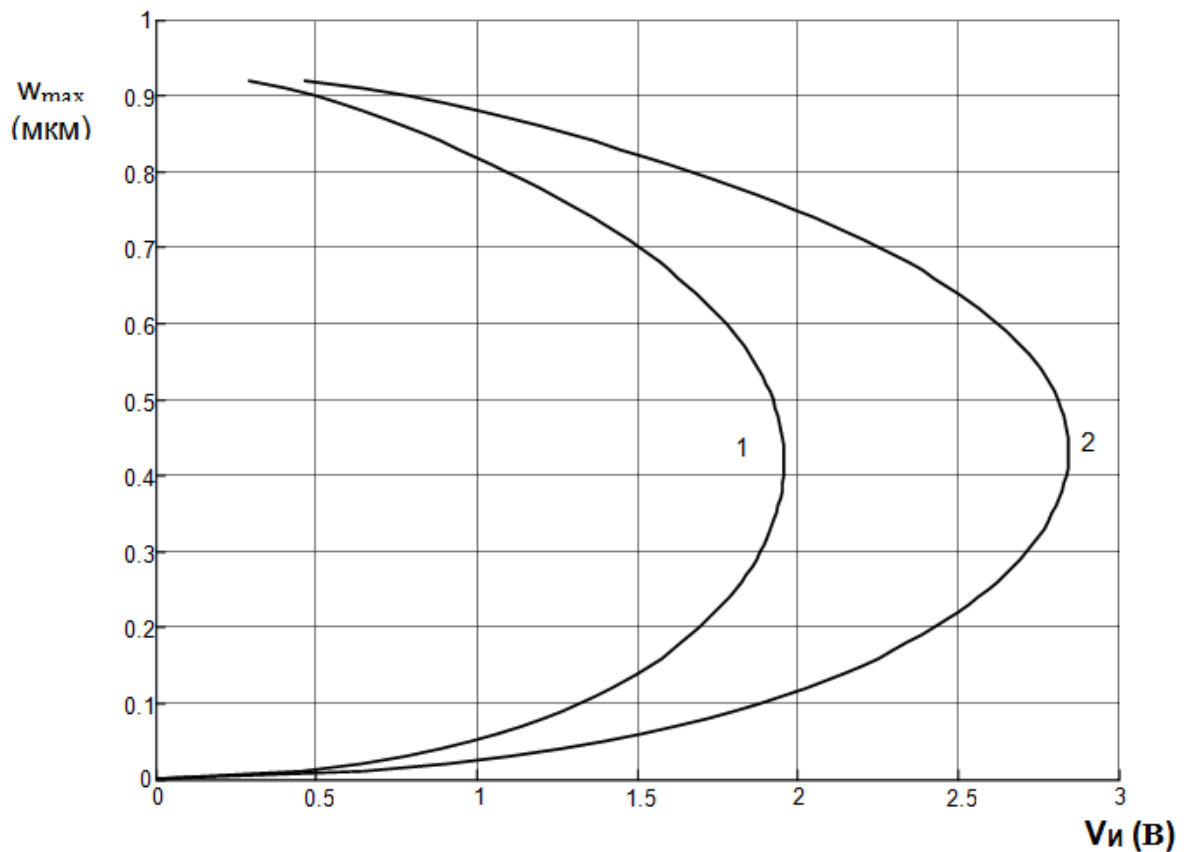


Рис. 2.10. Зависимости максимального прогиба изображенной на рис.2.9 диафрагмы $w_{\max}$ от управляющего напряжения V_H с учетом казимировского взаимодействия:

- 1 – приложение управляющего напряжения непосредственно к электродам;
- 2 – использование конденсатора ($C1=0.7\text{пФ}$)

Используя соотношения (2.30, 2.31, 2.35÷2.42), можно определить зависимость отклонения изображенной на рис.2.9 диафрагмы от подаваемого напряжения. Эти зависимости изображены на рис.2.10. $D=600\text{мкм}$, $a=1\text{ мкм}$, $h=1\text{ мкм}$. Приняли также $\gamma=1$, что соответствует случаю сверхпроводящих обкладок.

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что для актюаторов диафрагменного типа использование последовательно включенной емкости с целью подавления эффекта схлопывания малоэффективно.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОДВИЖНЫХ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР ДИАФРАГМЕННОГО И БАЛОЧНОГО ТИПА

Разработка технологического маршрута была ориентирована на процессы, имеющиеся в распоряжении отечественных предприятий электронной промышленности и включала в себя несколько этапов, в процессе которых изготавливались экспериментальные тестовые структуры и проводились различные их исследования (РЭМ-анализ, СЗМ-исследования, исследования электрофизических характеристик). По результатам этих исследований принимались решения о дальнейшем усовершенствовании технологического маршрута (на следующем этапе), добавлении новых технологических процессов или внесении корректировок в существующие, а также об изменении топологии экспериментальных тестовых структур.

Изготовление экспериментальных образцов проводилось в соответствии с разработанным базовым технологическим маршрутом производства планарных МЭМС, включающим в себя преимущественно стандартные технологические операции, использующиеся при производстве кремниевых интегральных схем (ИС), а также ряд специально разработанных операций — в том числе: формирования кремниевых микрорельефов на основе операций изотропного плазмохимического и анизотропного реактивно-ионного травления и формирования высокотемпературной металлизации на основе силицида платины.

Конструкция и принцип действия УЧЭ диафрагменного типа, описываемого в настоящей главе, аналогичны изложенным в [30, 31]. Основное отличие разрабатываемого в рамках данной работы прибора от описанного в [30, 31] состоит в том, что его изготовление ведется полностью по планарной технологии с применением процессов и материалов, принятых при производстве КМОП СБИС, что может значительно облегчить процесс интеграции этого микромеханического устройства с электронными схемами управления на одном кристалле. Основные стадии технологии изготовления поликремниевых УЧЭ диафрагменного типа, являющегося частью туннельного преобразователя, изображены на рис.3.1.

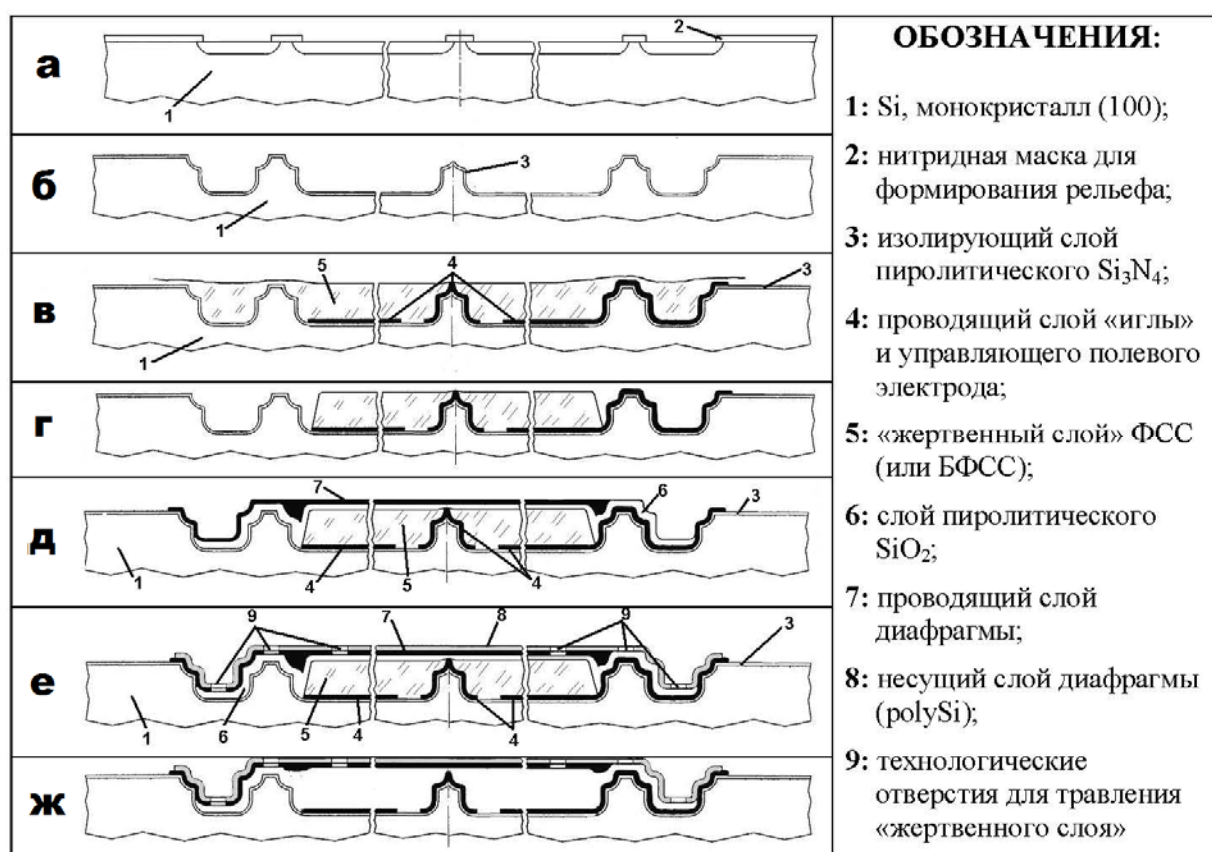


Рис. 3.1. Основные стадии технологии изготовления диафрагменного УЧЭ туннельного преобразователя

На первой стадии в кремниевой подложке путем ряда технологических операций [64, 103, 104] формируется рельеф, в данном случае состоящий из углубления и ультраострой заготовки для электрода-иглы, после чего на структуру наносится изолирующий слой нитрида кремния (рис.3.1,а-б).

Далее наносится металлизация иглы и отклоняющего электрода, затем – «жертвенный» слой (фосфоросиликатное стекло – ФСС или борофосфоросиликатное стекло – БФСС) (рис.3.1,в-г), верхняя граница которого совпадает с острием иглы, что может быть достигнуто либо при помощи оплавления поверхности стекла, либо посредством химико-механической планаризации. Эти операции необходимы, в частности, по причине конформного осаждения ФСС (или БФСС), когда его рельеф повторяет рельеф покрываемой поверхности. Было бы недопустимо оставлять поверхность «жертвенного» слоя не планаризованной, так как ее рельеф определяет форму наносимой позднее поликремниевой диафрагмы.

Возможна также замена операции планаризации рядом других технологических операций, направленных на минимизацию выступов, образующихся на поверхности жертвенного слоя над сформированными в кремнии «иглами». Смысл этих операций состоит в плазмохимическом удалении выступающих участков жертвенного слоя. Для этого в технологический процесс вводится дополнительная литография (ПШ «Окно иглы» – см. Приложение 4), отвечающая за формирование резистной маски, закрывающей всю поверхность обрабатываемой пластины кроме небольшого пространства (квадрат 5×5 мкм) вокруг сформированной «иглы». Через эту маску производится плазмохимическое вытравливание ФСС (или БФСС), находящегося вокруг «иглы», чем достигается удаление выступа, образовавшегося над иглой вследствие конформного осаждения ФСС (или БФСС). Эта операция может быть использована в случае отсутствия доступа к установкам химико-

механической планаризации или невозможности оплавления «жертвенного» слоя в силу ряда технологических причин (см. ниже).

На поверхность планаризованного или обработанного описанным способом «жертвенного» слоя может быть нанесен дополнительный слой окисла, задающий начальное расстояние между диафрагмой и электродом-иглой, после чего наносится слой металлизации (рис.3.1,д), на который (после нанесения изолирующего слоя), в свою очередь, осаждается основной слой поликремния, обеспечивающий жесткостные свойства диафрагмы (рис.3.1,е).

После вытравливания «жертвенного» слоя ФСС (рис.3.1,ж) через специально предусмотренные технологические отверстия, промывки и высушивания УЧЭ преобразователя может считаться сформированным. Операция высушивания является одной из критических [105, 106], так как от ее успешного проведения напрямую зависит работоспособность изготавливаемого устройства, подвижные части которого могут «прилипнуть» друг к другу в жидкой среде под действием капиллярных сил.

Для травления жертвенного слоя могут использоваться как традиционные растворы на основе плавиковой кислоты, так и перекисно-аммиачные растворы, обладающие большей селективностью к травлению SiO_2 по сравнению с кислотными травителями, но значительно уступающие последним в скорости травления.

Более подробно способ изготовления такой микроструктуры с описанием используемых при его проведении специальных технологических процессов и материалов изложен в дальнейших разделах настоящей главы.

3.1. Первый этап разработки технологии изготовления УЧЭ. Эскизный технологический маршрут. Изготовление первой экспериментальной партии образцов. Специальные операции формирования рельефа иглы и платиновой металлизации

Цель изготовления первой экспериментальной партии образцов УЧЭ монолитного туннельного преобразователя состояла, прежде всего, в выявлении проблем реализации оригинальной конструкции УЧЭ и определении направлений дальнейших работ, включая оптимизацию конструктивно-технологических параметров разрабатываемого изделия.

3.1.1. Характеристики конструкции и технологического процесса изготовления первых образцов УЧЭ монолитного туннельного преобразователя

- Материал подложки – монокристаллический кремний с ориентацией (100).
- Размер кристалла – 4×4 мм.
- Конфигурация и размеры диафрагмы – правильный восьмиугольник шириной 2 мм. Гофрирование краев диафрагмы не предусматривалось.
- Материал диафрагмы – пленка поликристаллического кремния толщиной 0,6 мкм.
- Металлизация иглы и диафрагмы – Ti (30 нм) + Pt (50 нм). Рисунок металлизации формировался методом обратной (взрывной) литографии с маской из фоторезиста.

- Высота иглы – 1,5 мкм.
- Материал изоляции между металлизацией иглы и подложкой, а также между металлизацией диафрагмы и несущим слоем поликремния – пленка пиролитического нитрида кремния толщиной 125 нм.
- «Жертвенный» слой – слой фосфоросиликатного стекла толщиной 0,9 мкм и двуокиси кремния толщиной 0,25 мкм, осажденные из газовой фазы (метод LPCVD).
- Диаметр кремниевых пластин – 100 мм.
- Фотолитография – на проекционной УСЭ модели ЭМ-584А (степпер с масштабом изображения 10:1).
- Количество фотошаблонов в комплекте – 5 шт.

Генерация изображения на фотошаблонах производилась с использованием электронно-лучевой установки ZBA-20 (производства ГДР конца 70-х гг. XX в.), возможности которой в части формирования рисунка ограничены генерацией прямоугольников, ориентированных под углами 0°, 45° и 90° к краю изготавливаемой фотомаски. Поэтому форма диафрагмы была выбрана в виде правильного восьмиугольника. Кадр размером 8,4×8,4 мм содержал четыре одинаковых структуры УЧЭ.

Первая экспериментальная партия состояла из 10 пластин диаметром 100 мм. Полный технологический маршрут был выполнен на 6 пластинах, в том числе с вытравливанием жертвенного слоя – на 3-х пластинах.

Сопроводительный лист первого варианта технологического маршрута изготовления УЧЭ туннельного преобразователя приведен в Приложении 1.

3.1.2. Формирование кремниевого микрорельефа «иглы»

Для получения в кремниевой подложке микрорельефа в виде «иглы» высотой около 2 мкм с достаточно острой вершиной (радиус закругления острия – порядка 10 нм) был использован технологический процесс, включающий:

- формирование комбинированной маски из фоторезиста и нитрида кремния с размерами (в плане) 2×2 мкм;
- изотропное плазмохимическое травление (ПХТ) кремния на глубину $0,6 \div 0,8$ мкм (с одновременным подтравливанием под край маски примерно на ту же величину);
- анизотропное реактивно-ионное травление (РИТ) кремния через ту же маску на глубину $1,2 \div 1,4$ мкм (рис.3.2);
- «заострение» иглы путем локального термического окисления кремния через ту же нитридную маску на глубину, равную половине оставшейся после комбинированного травления ширины вершины кремниевого «столбика» (рис.3.3 и рис.3.4).

При проведении операции реактивно-ионного травления кремния использовались стандартные (по времени и используемым материалам) процессы, принятые в полупроводниковом производстве. Из рис.3.2 видно, что для протравливания кремниевой подложки на необходимую глубину потребовалось двойное проведение процесса реактивно-ионного травления. Процесс травления проводился во фторсодержащей плазме.

Такая технологическая схема позволяет изготавливать конические кремниевые «иглы» с различными соотношениями площади основания к высоте и с различной степенью «остроты» (радиуса закругления) кончика иглы путем независимого управления каждой из трех стадий формирования микрорельефа.

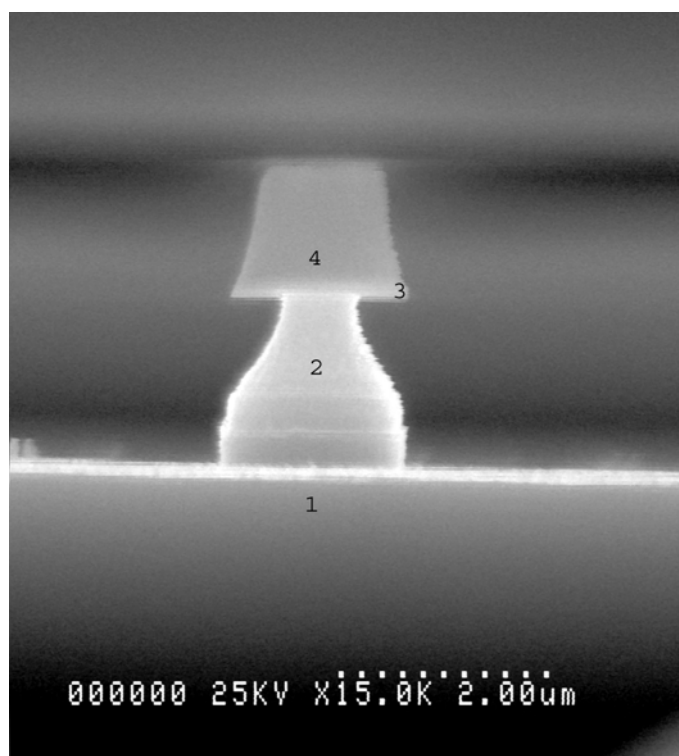


Рис. 3.2. Снимок на растровом электронном микроскопе (РЭМ) промежуточной стадии формирования кремниевой иглы преобразователя – после операций изотропного плазмохимического и анизотропного реактивно-ионного травления (РИТ) монокристаллического кремния через маску из фоторезиста и нитрида кремния

Похожая методика получения ультраострых игл с радиусом закругления острия порядка 10 нм описана в зарубежной периодической литературе [103].

Обозначения на рис.3.2: 1 – пластина монокристаллического кремния; 2 – «заготовка» для формирования иглы (монокристаллический кремний), 3 – маска из нитрида кремния (толщина Si_3N_4 – 0,13 мкм), 4 – маска из фоторезиста (толщина слоя фоторезиста – 1,3 мкм).

Основные размеры: ширина нитридной маски – 1,76 мкм, ширина основания «иглы» - 1,82 мкм, минимальная ширина «иглы» (вверху) – 0,78 мкм, «подтрав» под край маски – 0,49 мкм, высота «иглы» (общая глубина травления) – 1,64 мкм. Требуемая толщина SiO_2 при последующей операции «заострения» иглы – 0,89 мкм.

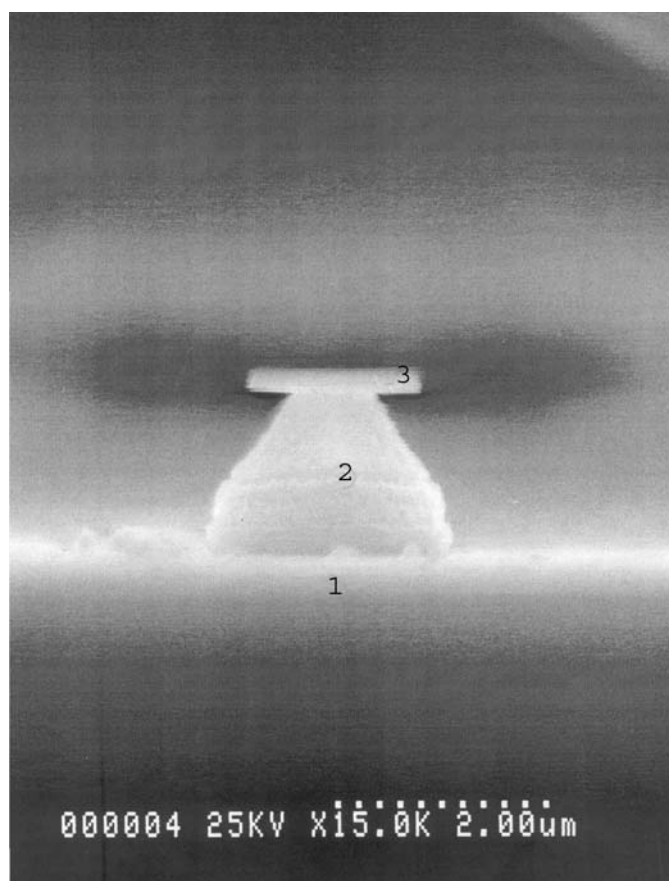


Рис. 3.3. РЭМ-снимок промежуточной стадии формирования кремниевой иглы преобразователя – после операции локального окисления кремния через нитридную маску с целью «заострения» иглы

Обозначения на рис.3.3: 1 – окисленная поверхность пластины монокристаллического кремния, 2 – двуокись кремния («игла» внутри), 3 – Si_3N_4 .

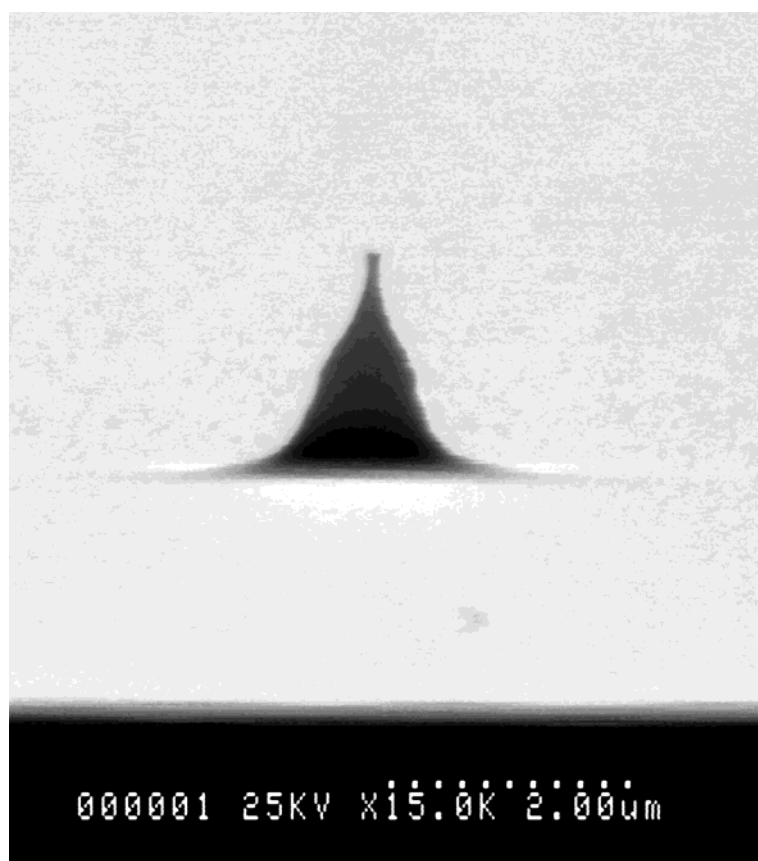


Рис. 3.4. РЭМ-снимок иглы после операции «заострения» и стравливания выращенного слоя SiO_2 (смыкания «фронтов» термического окисления не произошло)

Основные размеры: высота иглы – 1.96 мкм, ширина острия иглы (вверху) – 0.11 мкм.

3.1.3. Результаты контроля экспериментальных образцов, изготовленных по эскизному технологическому маршруту (первого этапа разработки)

При помощи оптического и растрового электронного микроскопов был проведен визуальный контроль структур, изготовленных по эскизному технологическому маршруту (первого этапа разработки).

Годных структур УЧЭ не обнаружено. Основная причина – самопроизвольный разрыв диафрагмы в процессе вытравливания «жертвенного слоя». На рис.3.5 приведен РЭМ-снимок полученных структур. Анализ РЭМ-снимков позволяет сделать предположение, что разрыв диафрагм может происходить под действием остаточных внутренних напряжений в слое пиролитического нитрида кремния толщиной 0,13 мкм, изолирующем пленку Pt-металлизации толщиной 50 нм от поликремниевой диафрагмы толщиной 0,6 мкм, а также может быть обусловлен большим различием в коэффициентах температурного расширения поликремния и материала металлизации.

Попытки снизить внутренние напряжения диафрагмы путем «мягкого» (с медленным нагревом и снижением температуры) отжига при температуре 1000°C готовой структуры с протравленными отверстиями в диафрагме не дали положительного результата – при вытравливании жертвенного слоя разрывы диафрагмы не были устранены, кроме того, в местах наиболее близкого контакта пленки платины с поликремниевой диафрагмой (т.е. по периферии отверстий в диафрагме, а также в местах выхода дорожек металлизации по краям диафрагмы) произошло частичное оплавление образовавшегося силицида платины.

Выбранная для первой экспериментальной партии УЧЭ туннельного преобразователя конструкция металлизации иглы и диафрагмы, состоящая из пленки платины толщиной 50 нм с адгезионным подслоем из титана толщиной 30 нм плохо выдерживает воздействие селективного для SiO_2 +ФСС травителя, содержащего плавиковую кислоту. На РЭМ-снимках (рис.3.6) видно, что после воздействия такого травителя пленка платины приобретает пористую структуру с локальными «вспучиваниями», что является следствием вытравливания подслоя титана в HF.

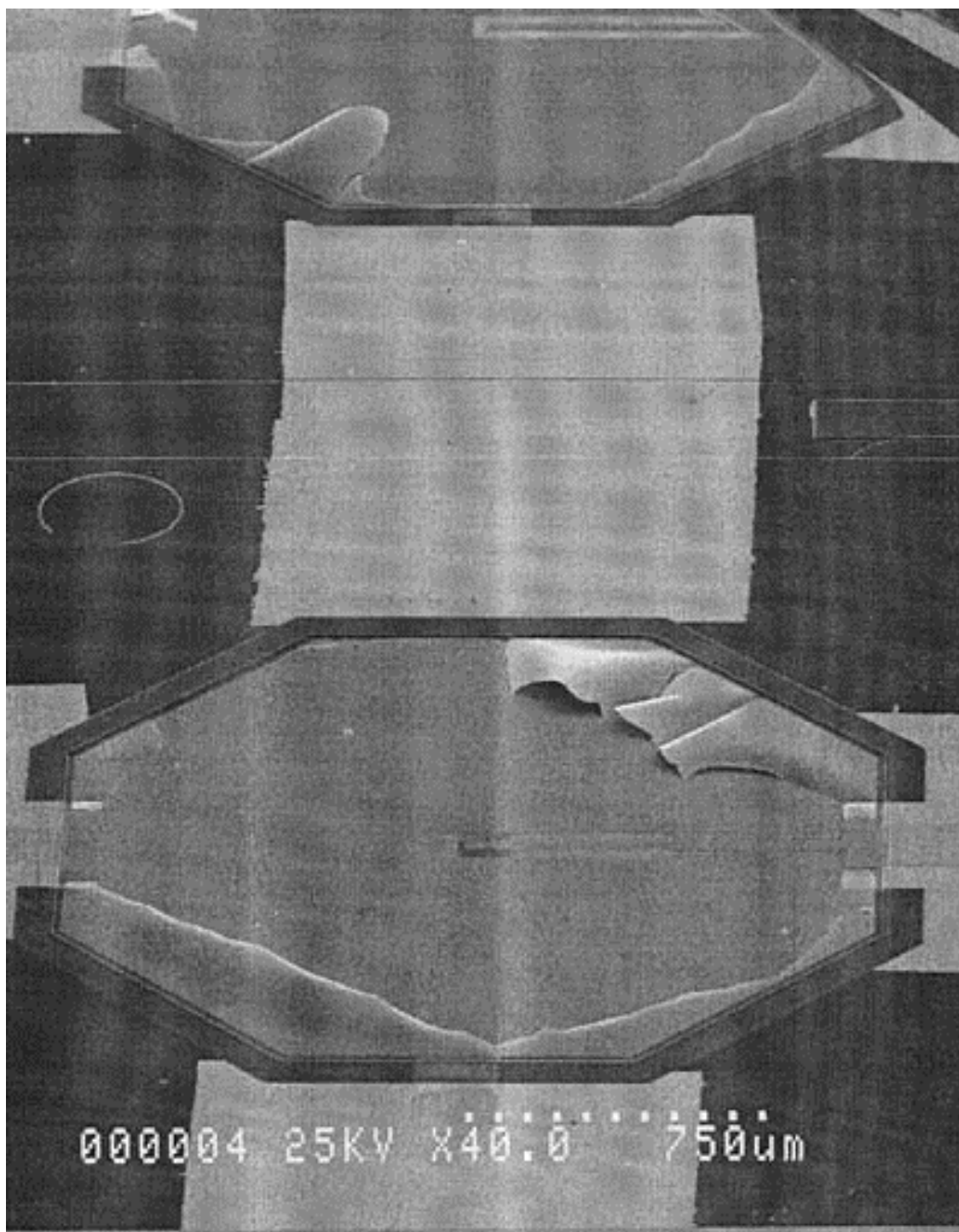


Рис. 3.5. РЭМ-снимок чувствительных элементов туннельного преобразователя, изготовленных по эскизному технологическому маршруту (первого этапа разработки). Разрыв диафрагм под действием остаточных напряжений

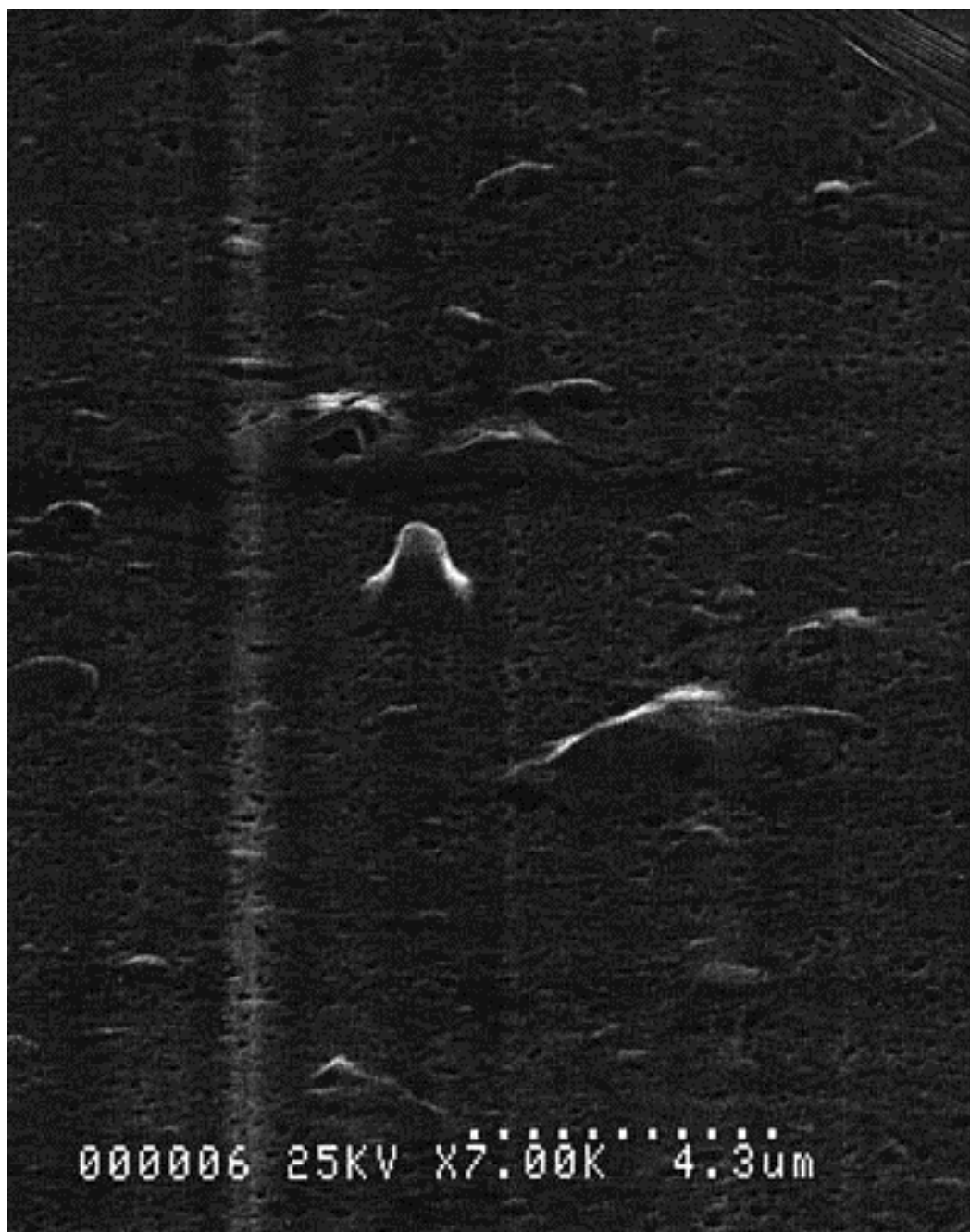


Рис. 3.6. РЭМ-снимок чувствительных элементов туннельного преобразователя, изготовленных по эскизному технологическому маршруту (первого этапа разработки). Пористая структура поверхности платиновой пленки нижней металлизации, обусловленная подтравливанием адгезионного слоя титана при вытравливании «жертвенного» слоя в HF

Для устранения негативных моментов, выявленных при изготовлении первой экспериментальной партии УЧЭ туннельного преобразователя, в ходе последующих этапов отработки технологического маршрута необходимо:

- провести коррекцию топологического рисунка с целью устранения недопустимых контактов отдельных слоев, в частности, платины с поликремниевой диафрагмой;
- разработать топологию и изготовить комплект промежуточных фотошаблонов (ПШ) УЧЭ туннельного преобразователя с различными размерами диафрагмы с целью оптимизации прочностных характеристик свободных диафрагм в зависимости от их линейных размеров;
- при изготовлении УЧЭ туннельного преобразователя с новым комплектом фотошаблонов исследовать прочность диафрагмы в зависимости от толщины слоя поликристаллического кремния;
- для металлизации иглы и диафрагмы вместо двухслойной пленки Ti-Pt использовать пленку чистой платины, осаждаемую магнетронным способом на горячую подложку, а для формирования рисунка платиновой металлизации вместо «взрывной» технологии использовать метод прямой фотолитографии с РИТ пленки платины, что исключает проблему, связанную с травлением Ti-подслоя в HF;
- для улучшения планаризации поверхности жертвенного слоя и снижения температуры оплавления (что, в свою очередь, необходимо для уменьшения воздействия на металлизацию) заменить ФСС на БФСС (борофосфоросиликатное стекло),

имеющее температуру оплавления более, чем на 100°C ниже, чем у ФСС.

3.2. Второй этап разработки технологии изготовления УЧЭ. Оработка технологии нанесения рисунка

На данном этапе работы ставилась цель разработки унифицированной тестовой структуры, содержащей упругие элементы различных топологий и предназначенной для отработки технологических процессов формирования рисунка металлизации, а также технологии получения упругих поликремниевых диафрагменных и балочных структур, не подверженных разрушению под действием остаточных механических напряжений. Дополнительно исследовалась возможность введения гофрировки краев диафрагмы в качестве средства для уменьшения механических напряжений в диафрагме. Технологический маршрут изготовления тестовой структуры составлялся с учетом результатов разработки эскизного технологического маршрута (первого этапа разработки).

3.2.1. Общие характеристики топологии тестовых структур и технологического процесса второго этапа разработки

- Материал подложки – монокристаллический кремний с ориентацией (100).
- Размер кристалла – 4×4 мм.
- Конфигурация и размеры заложенных в топологию структур – 15 различных вариантов чувствительных элементов с размерами диафрагмы от 0,2 мм до 2,0 мм и с различным

количеством гофров (все диафрагмы в форме правильного восьмиугольника), а также исследовательская структура, содержащая свободные консоли и двухсторонне закрепленные балки с электростатическим управлением. Формирование микрорельефа «гофров» предлагалось осуществить одновременно с процессом изготовления кремниевых «игл» по периферии будущей диафрагмы УЧЭ преобразователя. При выбранной ширине линий рисунка «гофров» (5 мкм) форма боковой стенки рельефа будет такой же, как на рис. 3.4, но с плоской вершиной шириной около 3 мкм, что обеспечивает формирование гофрированных краев диафрагмы при облегании ею полученных линий рельефа.

- Материал диафрагмы – пленка поликристаллического кремния толщиной 1,2 мкм и 2,4 мкм (в двух вариантах исполнения). Решение об увеличении толщины поликремниевого слоя по сравнению с эскизным маршрутом было принято из соображений увеличения прочности создаваемых диафрагм.
- Металлизация иглы и диафрагмы – металлическая платина или силицид платины (2 варианта). Литографию по платине предлагалось осуществлять как методом взрыва, так и реактивным ионным травлением.
- Высота иглы – 1,5 мкм.
- Материал изоляции между металлизацией иглы и подложкой, а также между металлизацией диафрагмы и несущим слоем поликремния – пленка пиролитического нитрида кремния толщиной 125 нм.
- «Жертвенный» слой – слой фосфоросиликатного стекла толщиной 0,9 мкм и двуокиси кремния толщиной 0,25 мкм, осажденные из газовой фазы (метод LPCVD).

- Диаметр кремниевых пластин – 150 мм.
- Для формирования фотолитографического рисунка тестовой структуры на пластинах монокристаллического кремния диаметром 150 мм была использована установка проекционной мультипликации модели ЭМ 5084АМ с максимальным размером кадра изображения 16×16 мм, что при размерах одного УЧЭ 4×4 мм давало возможность в составе одного кадра изображения разместить 16 различных вариантов тестовых элементов.
- Общее количество сгенерированных фотошаблонов – 10 шт. Генерация изображения проводилась на электронно-лучевой установке ZBA-20.

Сопроводительный листы для технологических маршрутов второго этапа разработки приведены в Приложениях 2 и 3.

Кроме того, в Приложении 4 приведена послойная разбивка топологии (фрагмент) разработанной тестовой структуры (один из вариантов диафрагменного УЧЭ).

3.2.2. Разработка технологии формирования рисунка металлизации

3.2.2.1. Разработка технологического процесса формирования рисунка металлизации на основе платины

На начальном этапе разработки технологии формирования рисунка металлизации в качестве материала проводящего слоя электродов «иглы» и диафрагмы была выбрана платина по следующим двум основным причинам:

- во-первых, для обеспечения работы туннельного преобразователя в обычных атмосферных условиях оба электрода туннельной пары должны быть изготовлены из максимально инертного благородного металла – т.е. из золота или платины, не окисляющихся на воздухе;
- во-вторых, предложенная конструкция и технологическая схема изготовления УЧЭ преобразователя предусматривают проведение достаточно высокотемпературных (650°C - 950°C) операций газофазного осаждения и отжига слоев БФСС, нитрида кремния и поликристаллического кремния после формирования слоев металлизации, что может выдержать без разрушения (плавления) пленки из благородных металлов – только платина.

Основная трудность при формировании рисунка в пленке платины – это ее высокая химическая инертность как в жидких химических растворах, так и при газофазных («сухих») методах плазмохимического или реактивно ионного травления. Поэтому обычно в планарной технологии рисунок в тонких пленках платины получают либо методом физического ионного распыления через маску из фоторезиста, либо методом обратной («взрывной») литографии через негативную маску из фоторезиста. Однако попытки применения этих методов при изготовлении данного прибора не увенчались успехом.

Чисто ионное травление физическим распылением тонкой пленки платины, например, ионами аргона, возможно только на полностью планарной поверхности – в рассматриваемом случае наличие достаточно высокого рельефа кремния приводит к тому, что на вертикальных стенках рельефа платина не вытравливается, и остаются электрические «закоротки», попытки удаления которых путем химического

дотравливания в «царской водке» не дали положительного результата из-за низкой стойкости фоторезистов в таком агрессивном составе.

Метод «взрывной» литографии в его классическом применении с использованием негативной маски из фоторезиста требует при вакуумном напылении платины обязательного применения адгезионных слоев титана или хрома, так как чистая платина в этом случае (при наличии органических остатков на поверхности после проявления фоторезиста) не имеет нужной адгезии к подложке. А наличие под пленкой платины адгезионных слоев титана или хрома приводит при последующем вытравливании «жертвенного слоя» БФСС и SiO_2 в плавиковой кислоте к подтравливанию адгезионного слоя (в нашем случае – титана) и к отслаиванию пленки платины.

Далее была предпринята попытка найти режимы прямого плазмохимического травления достаточно тонкой (50 нм) пленки платины в хлорсодержащей плазме, учитывая теоретическую возможность образования в определенных условиях хлоридов платины, обладающих некоторой летучестью при относительно высокой температуре. Действительно, был найден режим с большим расходом хлорсодержащего газа и при высокой мощности плазменного генератора, при котором скорость плазмохимического травления платины достигала приемлемых значений, но при этом скорость травления нижележащего слоя нитрида кремния была намного выше, что приводило к быстрому разрушению нитридной изоляции. Таким образом, и этот способ прямого травления пленки платины не дал удовлетворительных результатов.

Наконец, положительные результаты при разработке методов формирования рисунка платиновой металлизации были получены с использованием «взрывной» литографии, но с применением неорганической негативной маски, состоящей из комбинации слоев двуокиси кремния (толщиной 0,25 мкм) и нитрида кремния (толщиной

0,13 мкм). При формировании рисунка негативной маски использовались стандартные процессы реактивно ионного травления нитрида кремния с последующим изотропным химическим травлением слоя SiO_2 . В результате формировался вогнутый профиль края маски с нависающим козырьком из нитрида кремния, что обеспечивало четкий обрыв пленки платины при последующем после напыления 50 нм чистой платины «взрыве» негативной маски в растворе плавиковой кислоты. Проблема адгезии пленки чистой платины была решена за счет магнетронного напыления платины на горячую (350°C) подложку, при котором достаточно высокая энергия атомов платины, выбиваемых ионами аргона из мишени, обеспечивает повышенное сцепление пленки чистой платины с подложкой.

Действительно, первые эксперименты в этом направлении показали, что адгезия пленки платины толщиной 50 нм оказалась достаточной не только при проведении операции «взрывной» литографии через комбинированную маску из $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, но и при последующем газофазном осаждении «жертвенного» слоя БФСС толщиной более 1 мкм при температуре 650°C .

Однако при проведении последующей более высокотемпературной операции оплавления БФСС при температуре 850°C произошло массовое отслаивание пленки платины, особенно на более протяженных участках металлизации в области полевого управляющего электрода и на контактных площадках. При этом местами наблюдался отрыв пленки платины вместе с ниже лежащим слоем изоляции из Si_3N_4 . Это говорит о том, что причиной отслаивания платиновой металлизации является не столько проблема адгезии пленки платины, а скорее – механические напряжения, возникающие при высокотемпературной (850°C) операции оплавления БФСС из-за значительной разницы между коэффициентами термического расширения кремния и металлической платины. Можно

также предположить, что существенную роль при разрыве диафрагм на первом этапе разработки технологического маршрута играл именно этот эффект.

3.2.2.2. Разработка технологического процесса формирования рисунка металлизации на основе силицида платины

На основании отрицательных результатов всех вышеописанных попыток использования пленок металлической платины в качестве материала электродов чувствительного элемента туннельного преобразователя, возникла необходимость продолжить поиск подходящего материала, содержащего в своем составе атомы «благородного» металла и обладающего достаточной термостойкостью по отношению к последующим операциям газофазного осаждения. Выбор был сделан в пользу силицида платины. Этот материал образуется в результате твердофазной реакции «вжигания» пленки металлической платины в монокристаллический или поликристаллический кремний, обладает достаточной для данного прибора электрической проводимостью и устойчив к термообработке до 830°C. Кроме того, применение силицида платины вместо металлической платины решает проблему формирования топологического рисунка электродов туннельного преобразователя. Вместо трудоемкого и недостаточно качественного процесса «взрывной» литографии по платине с применением негативной маски из $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$, для формирования рисунка из силицида платины достаточно обычной фотолитографии с плазменным или реактивно-ионным травлением (РИТ) пленки поликремния с последующим напылением, вжиганием и травлением не прореагировавшей с кремнием платины в «царской водке».

Технологический маршрут изготовления УЧЭ туннельного преобразователя был скорректирован с учетом операций формирования рисунка металлизации из силицида платины. Сопроводительный лист для скорректированного технологического маршрута второго этапа разработки приведен в Приложении 3.

3.2.2.3. Исследование структурных и электрофизических характеристик электродов из силицида платины на различных стадиях технологического процесса

Для исследования структурных (размер зерна и микрорельеф поверхности) и электрофизических (удельное сопротивление) характеристик электродов из силицида платины были изготовлены экспериментальные образцы тестовой структуры чувствительных элементов туннельного преобразователя с электродами из силицида платины в соответствии с вновь разработанным (скорректированным) технологическим маршрутом.

С целью определения структурных и электрофизических свойств силицидных пленок были проведены СЗМ-исследования поверхности до и после температурной обработки образца при температуре 850°C [63÷65, 108, 109].

Проводилось СТМ-исследование поверхности силицидной пленки до термообработки со снятием характеристики «ток-высота» (рис.3.7) с использованием зонда из платино-иридиевого сплава, полученного методом механического заострения. Характер зависимости «ток-высота» имеет ярко выраженный экспоненциальный характер, свидетельствующий о наличии туннельного тока.

Кроме того, были проведены АСМ-исследования поверхности до (рис.3.8,а,б) и после (рис.3.8,в,г) температурной обработки образца при температуре 850°C. Топография поверхности исследовалась в полуконтактном режиме АСМ (Рис.3.8а,в). Измерение сопротивления растекания проводилось при использовании зонда с платиновым покрытием при прикладываемом напряжении $U = +3,5\text{В}$ в контактном режиме АСМ (рис.3.8,б,г).

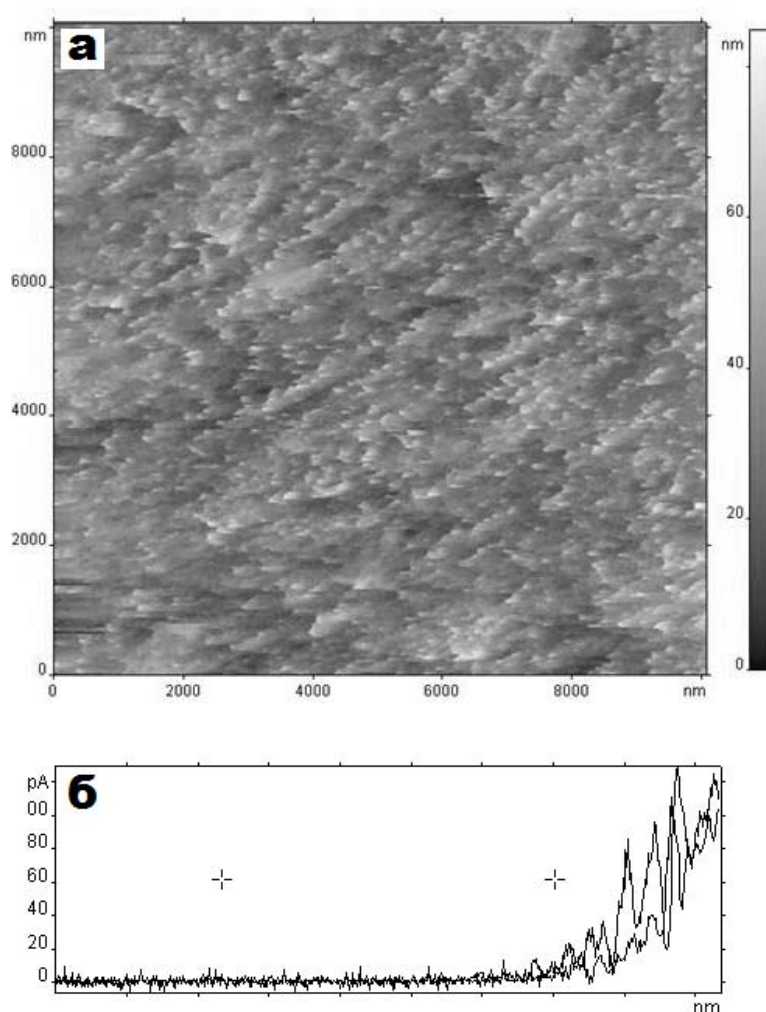


Рис. 3.7. СТМ-изображение поверхности силицида платины до термообработки ($V = +0.3\text{ В}$, $I_t = 25\text{ пА}$) (а) и характеристика «ток-высота» (б)

Морфология поверхности неоднородна с образованием конгломератов $60\div 200$ нм. На картине сопротивления растекания до термообработки видны образования величиной $10\div 80$ нм (тёмные включения), которые можно интерпретировать как неэлектропроводные области, сформированные выходом на поверхность кремния с последующим окислением. Латеральные (по поверхности) конгломераты $0,1\div 0,3$ мкм на площади $1\text{мкм}\times 1\text{мкм}$ коррелируют с областями более высокой электропроводности.

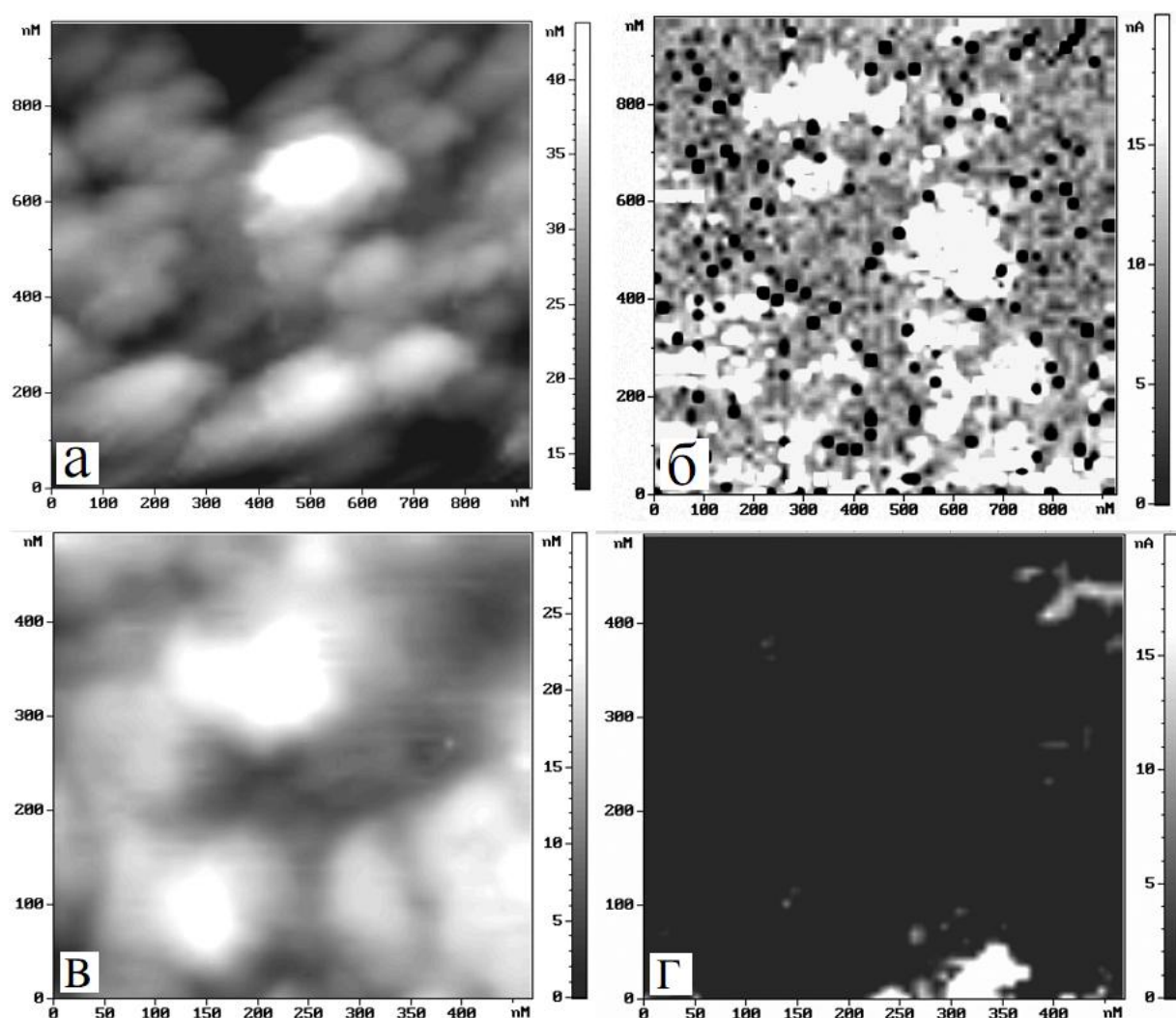


Рис. 3.8. АСМ-изображения топографии и сопротивления растекания для пленки силицида платины до и после термообработки при температуре 850°C

Картина сопротивления растекания после термообработки показывает низкую проводимость поверхности ($I < 0.2$ нА при $U = +2.5$ В), однако на ней присутствуют проводящие включения размером $10 \div 15$ нм.

По результатам исследований можно сделать вывод о том, что пленки силицида платины обладают необходимыми характеристиками для использования их в качестве электродов чувствительного элемента туннельного преобразователя. Однако после термической обработки при температуре 850°C происходит значительная перекристаллизация и рост зерен силицида платины, обладающих необходимой проводимостью, с одновременным увеличением площади плохо проводящих участков поверхности.

Было определено, что максимальная температура термообработок не должна превышать 830°C – температуры плавления эвтектического состава силицида платины. Однако идеальным решением в данном случае является применение метода химико-механической планаризации для выравнивания поверхности «жертвенного слоя», что позволяет и вовсе обойтись без высокотемпературных обработок. Измерения проводились на СЗМ Solver P47 (фирма NT-MDT, Зеленоград).

3.2.3. Результаты РЭМ-контроля экспериментальных образцов, изготовленных по технологическому маршруту второго этапа разработки

Кремниевые пластины с экспериментальными образцами чувствительных элементов, изготовленных в соответствии со скорректированным технологическим маршрутом, были исследованы с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Было установлено, что после критической операции «освобождения» диафрагм путем химического вытравливания «жертвенных» слоев ФСС и

двуокиси кремния (SiO_2) в буферном растворе на основе фтористого аммония и плавиковой кислоты были получены целые диафрагмы во всех 15 вариантах чувствительных элементов, отличающихся размерами диафрагмы (от 200 до 2000 мкм), количеством и конфигурацией гофров по периферии диафрагмы, а также при обоих исследованных значениях толщины поликристаллического кремния (1,2 мкм и 2,4 мкм), образующего основу диафрагмы (рис. 3.9).

Анализ специальных тестовых элементов в виде свободных консолей и балок полученных экспериментальных образцов методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) показал, что после вытравливания «жертвенного» слоя ФСС освобожденные диафрагмы (и, соответственно, тестовые элементы в виде консолей и балок) самопроизвольно изгибаются

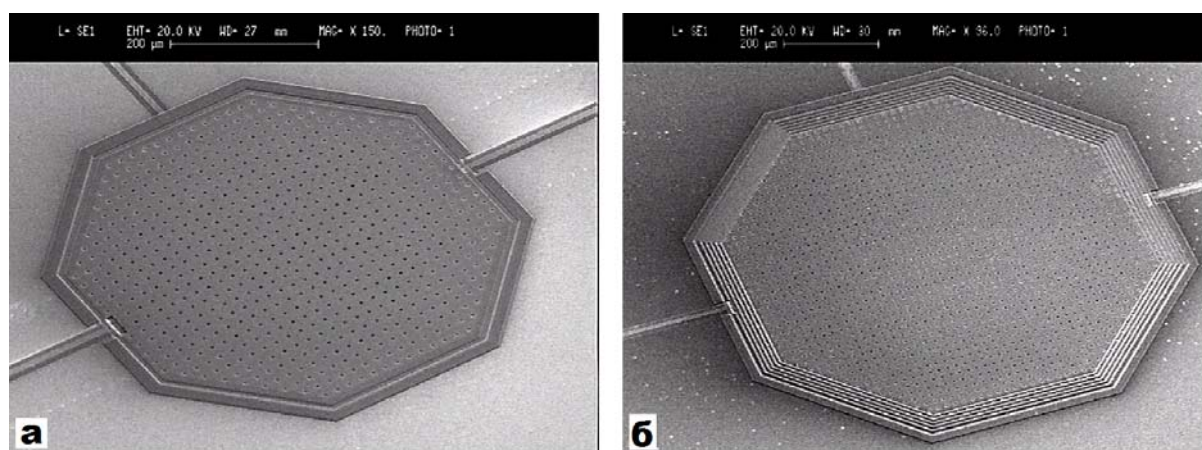


Рис. 3.9. РЭМ-снимки УЧЭ, изготовленных по технологическому маршруту второго этапа разработки:

а – диафрагма из поликремния толщиной 1,2 мкм размером 600 мкм без гофров;

б – диафрагма из поликремния толщиной 2,4 мкм размером 1000 мкм с 5-ю гофрами

под действием внутренних напряжений в структурных слоях поликристаллического кремния, нитрида кремния и силицида платины, образующих конструкцию диафрагмы.

При этом явно наблюдается влияние толщины поликристаллического кремния на степень и характер деформации тестовых элементов. Свободные консоли, закрепленные на подложке только с одной стороны, изгибаются тем сильнее, чем тоньше слой поликремния (рис. 3.10).

Наоборот, свободные балки, закрепленные на подложке с двух сторон, имеют большую величину выгиба у образцов с большей толщиной поликремния (рис.3.11).

Эти наблюдения хорошо согласуются с известными литературными данными о том, что пленки поликристаллического кремния, осажденные пиролитическим методом при температурах более 600°C (а в данном случае использовался стандартный процесс осаждения поликремния при температуре 625°C) имеют внутреннее напряжение сжатия и, при освобождении от связей с подложкой, самопроизвольно расширяются [3], что и приводит к выгибу структур, закрепленных с обеих сторон, таких как консоли и диафрагмы. Однако это не должно приводить к изгибу свободных консолей, закрепленных на подложке только с одной стороны.

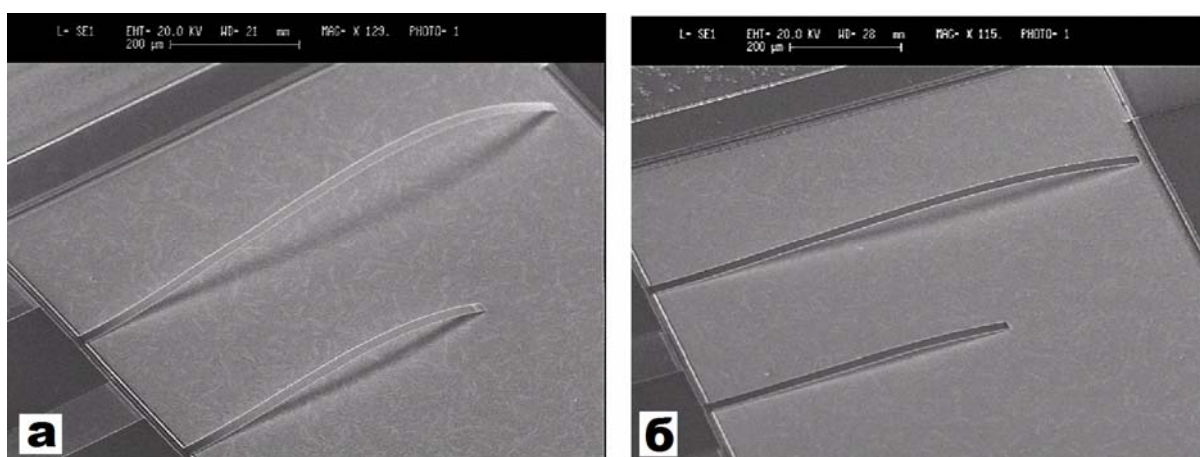


Рис. 3.10. Консоли толщиной 1,2 мкм (а) и 2,4 мкм (б)

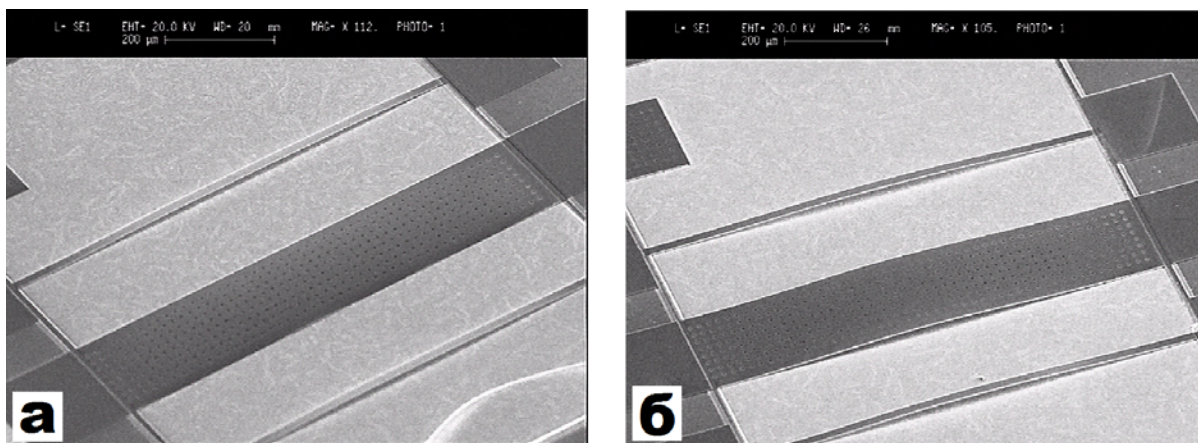


Рис. 3.11. Балки с двухсторонним закреплением толщиной 1,2 мкм (а) и 2,4 мкм (б)

Для объяснения такого эффекта (рис.3.10) необходимо в нашем случае учитывать многослойную структуру диафрагм и тестовых элементов. Кроме основного слоя поликристаллического кремния толщиной 1,2 мкм или 2,4 мкм диафрагма имеет снизу изолирующий слой нитрида кремния (Si_3N_4) толщиной 0,13 мкм и электропроводящую пленку силицида платины толщиной около 0,11 мкм. Данных о величине и знаке внутренних напряжений в пленке силицида платины обнаружить не удалось, однако в отношении пленок нитрида кремния, полученных пиролитическим методом при температуре более 780°C , известно, что такие пленки имеют внутренние напряжения растяжения [3].

При освобождении от подложки пленка нитрида кремния стремится к сжатию – то есть действует в противоположном направлении по отношению к самопроизвольно расширяющейся пленке поликремния, что и приводит к изгибу свободных консолей. Понятно, что более толстый слой поликремния обладает большей жесткостью и меньше изгибается под действием сжимающейся пленки нитрида кремния, что и наблюдается при анализе экспериментальных образцов (рис.3.11).

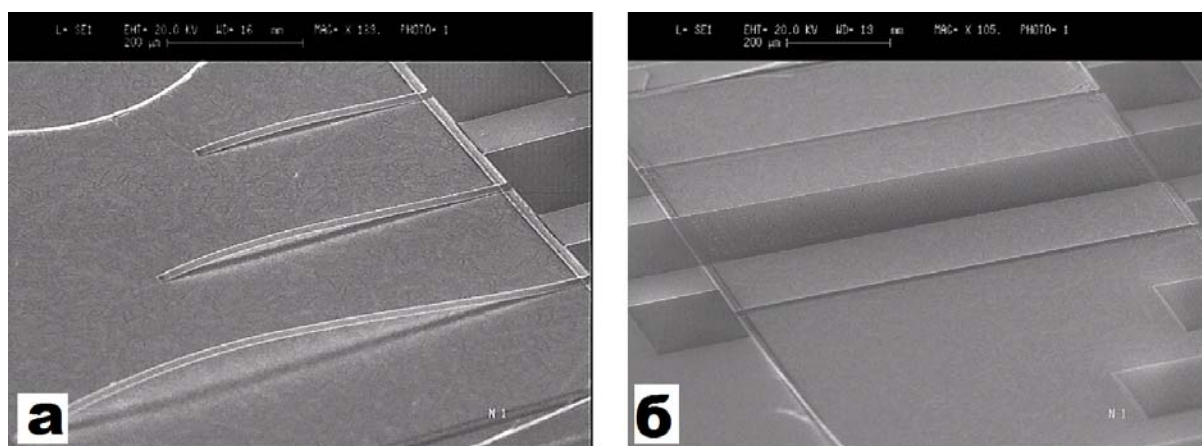


Рис. 3.12. Балки с двухсторонним закреплением толщиной 1,2 мкм (а) и 2,4 мкм (б)

Исходя из этих наблюдений и их анализа, была предпринята попытка уравновесить действующие на диафрагму сжимающие усилия путем введения в конструкцию диафрагмы еще одного слоя нитрида кремния, осаждаемого поверх слоя поликремния в тех же технологических режимах и той же толщины, что и нижний изолирующий слой нитрида. Пробные пластины со структурами чувствительных элементов туннельного преобразователя, изготовленные с применением дополнительного симметричного слоя нитрида кремния поверх поликремниевой диафрагмы, показали значительное снижение степени изгиба диафрагм и, соответственно, тестовых консолей и балок (рис.3.12).

Заключительные кремниевые пластины с экспериментальными образцами чувствительных элементов туннельных преобразователей были изготовлены с применением верхнего слоя нитрида кремния, что позволило снизить деформацию диафрагм под действием внутренних напряжений. Однако, для полной минимизации данного негативного эффекта необходим комплексный подход, предусматривающий как конструктивные (нанесение дополнительных пленок напряженного

нитрида), так и технологические (отработка режимов нанесения пленок поликремния) методы уменьшения деформации диафрагм под действием внутренних напряжений в используемых пленках [62].

3.2.4. Результаты электроизмерений экспериментальных образцов, изготовленных по технологическому маршруту второго этапа разработки

Объектом измерений являлись тестовые структуры УЧЭ интегрального туннельного преобразователя из экспериментальной партии, изготовленные по технологическому маршруту второго этапа разработки и представляющие собой снабженные слоем нижней металлизации поликремниевые восьмиугольные диафрагмы различных размеров, «подвешенные» над отклоняющим электродом и электродом-«иглой». Также измерялись электрические характеристики балочных элементов, изготовленных по той же технологии, что и диафрагмы, и подвешенных над общим нижним электродом.

В процессе измерений определялись сопротивления между контактными площадками образцов. При измерениях использовались: зондовая установка с ручным позиционированием пластины, прибор ЦУИП, характериограф Techtronic-577. Снимались величины сопротивлений между контактами образцов при напряжении $V=10\text{В}$. Для некоторых образцов были сняты ВАХ.

На рис.3.13 показаны контакты УЧЭ преобразователя. В табл. 3.1 приведены результаты измерения сопротивления между контактами 1-2 и 2-3 при помощи прибора ЦУИП и зондовой установки с ручным позиционированием пластины.

Таблица 3.1

Результаты измерения сопротивления между контактами
тестовых образцов УЧЭ туннельного преобразователя

Пластина	Область	Образец, размер, дополнительно	Сопротивление между контактами 1 и 2 при V=10 В, (МОм)	Сопротивление между контактами 2 и 3 при V=10 В, (МОм)
1	2	3	4	5
№1, $h_{\text{polySi}} = 1,2$ мкм	1	Диафрагма, 2000 мкм	52.30	10.10
		Диафрагма, 1800 мкм	42.70	11.24
		Диафрагма, 1600 мкм	48.10	5.01
		Диафрагма, 1400 мкм	5.16	6.19
		Диафрагма, 1200 мкм	2.76	6.14
		Диафрагма, 1000 мкм	2.17	6.72
		Диафрагма, 800 мкм	1.24	6.05
		Диафрагма, 600 мкм	48.67	8.5
		Диафрагма, 400 мкм	5.71	3.46
		Диафрагма, 300 мкм	3.21	8.26
		Диафрагма, 200 мкм	84.6	6.5
		Диафрагма, 1000 мкм, 1 гофр по периметру	30.05	12.56
		Диафрагма, 1000 мкм, 2 гофра по периметру	5.81	4.50
		Диафрагма, 1000 мкм, 5 гофров по периметру	2.52	18.45
		Диафрагма, 1000 мкм, 5 гофров по 4-м сторонам	3.13	38.5
		Балочная структура 200 мкм × 20 мкм	∞	-
	2	Диафрагма, 2000 мкм	6.24	10.95
		Диафрагма, 1800 мкм	5.92	21.45
		Диафрагма, 1600 мкм	23.45	13.87
		Диафрагма, 1400 мкм	0.76	2.78
		Диафрагма, 1200 мкм	30.12	7.54
		Диафрагма, 1000 мкм	67.76	7.54
		Диафрагма, 800 мкм	1.42	17.09
		Диафрагма, 600 мкм	4.04	4.09
		Диафрагма, 400 мкм	4.19	25.67
		Диафрагма, 300 мкм	3.94	5.71
		Диафрагма, 200 мкм	31.34	32.45
		Диафрагма, 1000 мкм, 1 гофр по периметру	1.13	7.05
		Диафрагма, 1000 мкм, 2 гофра по периметру	91.09	95.67
		Диафрагма, 1000 мкм, 5 гофров по периметру	31.75	43.3

Таблица 3.1 (продолжение)

1	2	3	4	5
№1, $h_{\text{polySi}} = 1,2$ мкм	2	Диафрагма, 1000 мкм, 5 гофров по 4-м сторонам	20.24	30.87
		Балочная структура 200 мкм × 20 мкм	∞	-
№2, $h_{\text{polySi}} = 2,4$ мкм	1	Диафрагма, 2000 мкм	23.56	47.18
		Диафрагма, 1800 мкм	26.34	35.08
		Диафрагма, 1600 мкм	25.78	13.67
		Диафрагма, 1400 мкм	6.79	12.58
		Диафрагма, 1200 мкм	34.50	2.76
		Диафрагма, 1000 мкм	2.17	4.57
		Диафрагма, 800 мкм	3.46	2.56
		Диафрагма, 600 мкм	24.57	49.65
		Диафрагма, 400 мкм	32.89	35.87
		Диафрагма, 300 мкм	23.28	37.58
		Диафрагма, 200 мкм	87.35	65.64
		Диафрагма, 1000 мкм, 1 гофр по периметру	26.57	21.48
		Диафрагма, 1000 мкм, 2 гофра по периметру	25.68	35.44
		Диафрагма, 1000 мкм, 5 гофров по периметру	12.35	35.68
		Диафрагма, 1000 мкм, 5 гофров по 4-м сторонам	21.46	14.58
		Балочная структура 200 мкм × 20 мкм	∞	-
	2	Диафрагма, 2000 мкм	26.54	56.76
		Диафрагма, 1800 мкм	5.31	23.45
		Диафрагма, 1600 мкм	7.34	6.24
		Диафрагма, 1400 мкм	21.58	15.67
		Диафрагма, 1200 мкм	23.45	21.34
		Диафрагма, 1000 мкм	32.43	12.62
		Диафрагма, 800 мкм	17.87	11.48
		Диафрагма, 600 мкм	14.67	12.19
		Диафрагма, 400 мкм	4.67	6.81
		Диафрагма, 300 мкм	31.59	20.41
		Диафрагма, 200 мкм	26.58	21.75
		Диафрагма, 1000 мкм, 1 гофр по периметру	12.4	1.36
		Диафрагма, 1000 мкм, 2 гофра по периметру	86.06	75.63
		Балочная структура 200 мкм × 20 мкм	∞	-

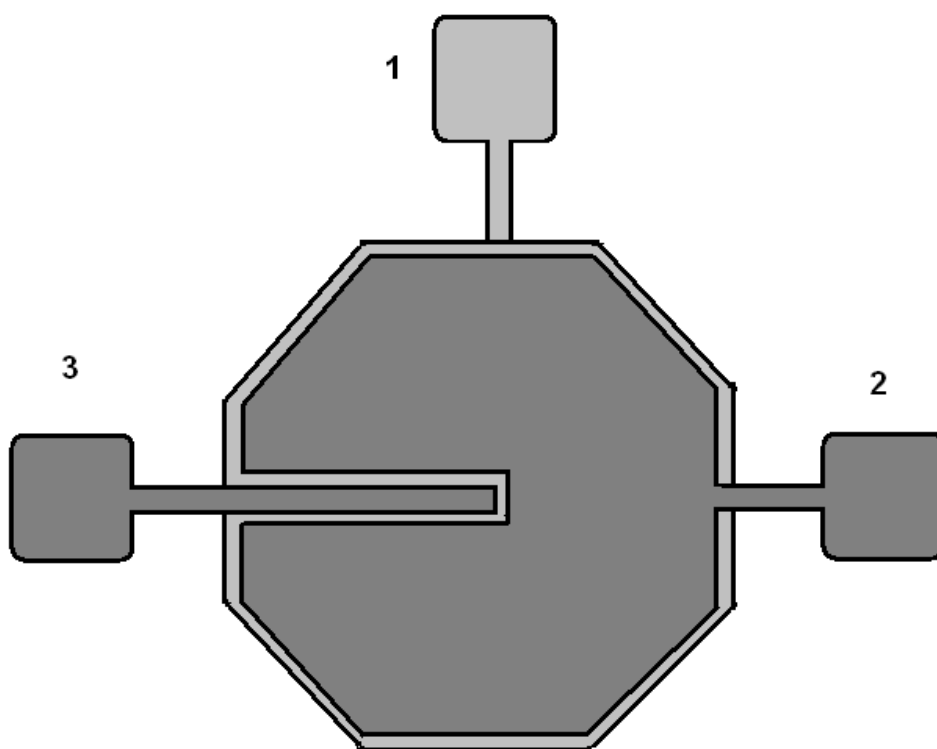


Рис. 3.13. Расположение контактов измеряемых УЧЭ:

- 1 – контактная площадка металлизации диафрагмы;
- 2 – контактная площадка отклоняющего электрода;
- 3 – контактная площадка электрода-«иглы»

Типичный вид полученных ВАХ изображен на рис.3.14. При достижении напряжением, подаваемым между контактами 1 и 2, некоторого порогового значения ($\sim 15\text{В}$), наблюдалось резкое падение сопротивления. Значение сопротивления на первоначальный уровень не возвращалось. Это экспериментально подтверждает факт электростатического схлопывания диафрагмы с отклоняющим электродом, а также свидетельствует об электрическом приваривании диафрагмы к отклоняющему электроду вследствие их контакта и последующего разогрева под действием протекающего тока.

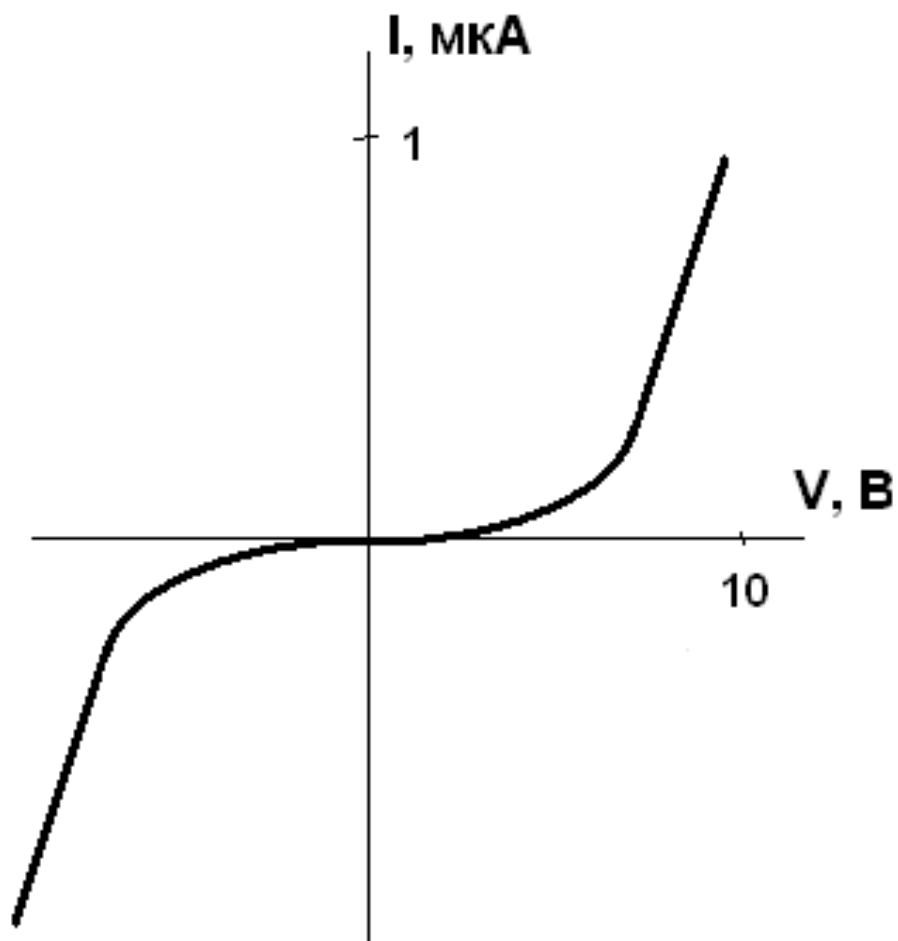


Рис. 3.14. Типичный вид ВАХ между контактами 1 и 2 образцов диафрагменного типа

По результатам измерений можно сделать следующие выводы. Во всех образцах диафрагменного типа при прилагаемом напряжении $V=10\text{В}$ наблюдаются токи утечки порядка нескольких микроампер. Причиной этого являются поликремниевые «закоротки», возникающие вследствие недоэкспонирования фоторезиста в областях резкого перепада высоты рельефа подложки, а также «закоротки» через подложку, возникающие вследствие повреждения изолирующего нитридного слоя на острых краях

углублений. Механизмы этих явлений и методы борьбы с ними описаны ниже.

3.2.5. «Закоротки» и обрывы проводников. Механизмы возникновения и методы борьбы

На Рис.3.15 показан РЭМ-снимок скола пластины с нанесенным резистом в месте резкого перепада высоты рельефа подложки. Высота изображенной «ступеньки» (~2 мкм) превышает толщину резиста (1,2 мкм), наносимого по стандартному технологическому процессу, принятому на производстве в ОАО «Ангстрем».

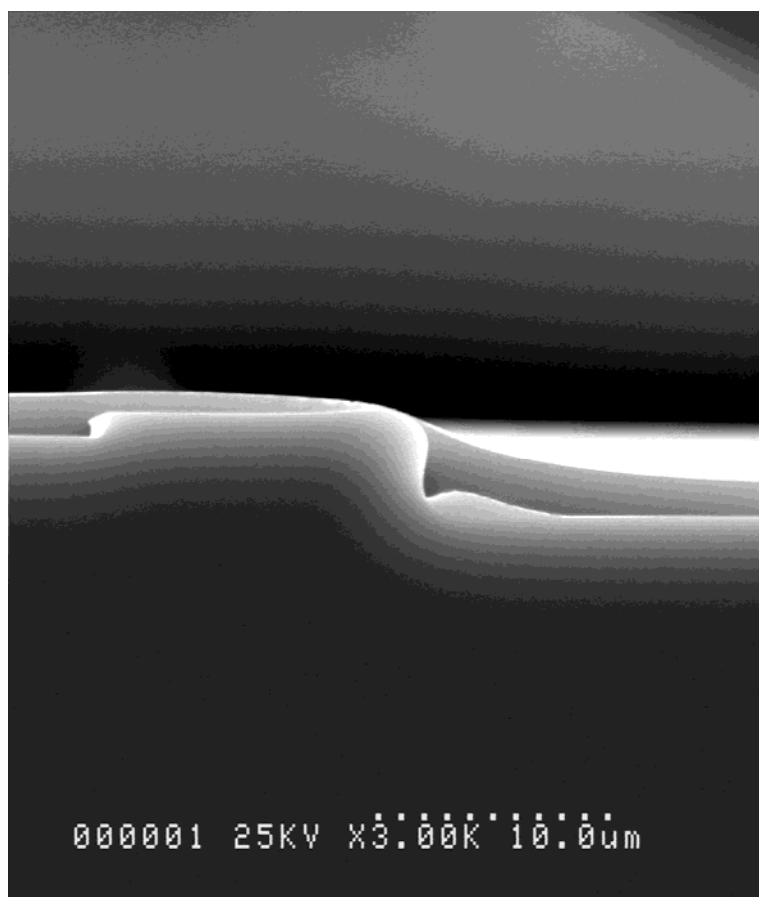


Рис. 3.15. Форма резиста в районе перепада высоты рельефа подложки

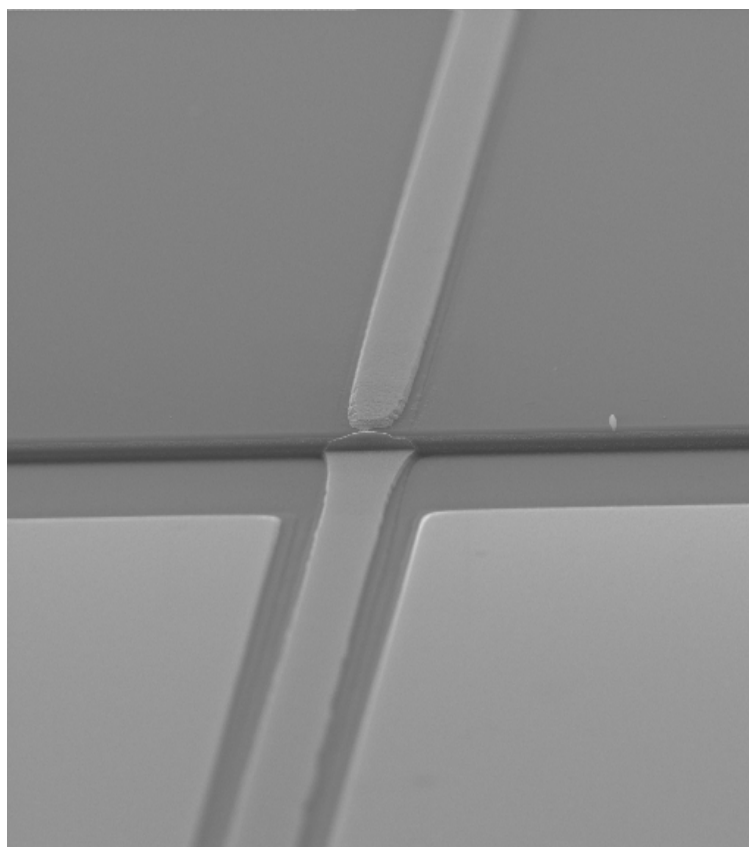


Рис. 3.16. Обрыв маски проводника на краю углубления, вызванный переэкспонированием резиста

В конструкции УЧЭ туннельного преобразователя подобные перепады высот рельефа встречаются по периферии диафрагмы, а также в местах расположения рисунка гофров. В местах резких перепадов высоты толщина резиста отличается от требуемой как в меньшую (на высоких областях рельефа), так и в большую (на низких областях рельефа) сторону.

Это обусловлено особенностями его нанесения (центрифугирование) и приводит к неравномерной экспозиции по полю засветки. Так после проявления у края углубления изнутри может остаться неудаленная полоска резиста, вносящая искажения в маску и не позволяющая правильно сформировать рисунок нижней металлизации (наличие такой полоски впоследствии приводит к электрическому контакту между

электродом иглы и отклоняющим электродом). При увеличении дозы экспонирования возможен обрыв маски проводника на краю углубления (рис.3.16), а также на краях рисунка гофров.

Для борьбы с этими явлениями можно предложить несколько решений.

Во-первых, возможно увеличить толщину наносимого резиста, уменьшив скорость вращения центрифуги, используемой при нанесении. Однако этот метод плохо применим в условиях серийного полупроводникового производства, где все имеющиеся установки нанесения резиста работают в строго определенном однажды заданном режиме.

Второй метод заключается в следующем: обычным образом наносится слой резиста, экспонируется и проявляется так, чтобы в углублениях не оставалось неудаленных полосок. После этого проэкспонированная резистная маска подвергается термическому задубливанию при температуре 170°C. При такой температуре резист теряет свои светочувствительные свойства и становится слабо растворим в органических растворителях, применяемых для разбавления резистов. Далее поверх сформированной таким образом резистной маски наносится еще один слой резиста и экспонируется, при этом формируемая вторая маска закрывает места предполагаемых обрывов первой маски в местах резких перепадов высоты рельефа. Так, в две стадии формируется маска, обеспечивающая корректное нанесение рисунка нижней металлизации.

Электрометрические измерения выявили еще один вариант электрических «закоротов» – отклоняющего электрода с электродом диафрагмы через подложку. Подобные дефекты могут возникать вследствие повреждения слоя изолирующего пиролитического нитрида, наносимого на монокремниевую подложку на начальных стадиях технологического процесса. Слой нитрида является сильно напряженным,

поэтому его повреждение вполне вероятно в местах дополнительной концентрации напряжений – на границах углубления. В качестве метода борьбы с этим явлением можно предложить замену пиролитического нитрида кремния на менее напряженный плазмохимический, а также увеличение толщины изолирующего слоя.

3.3. Рекомендации к выполнению третьего этапа разработки технологии изготовления УЧЭ туннельного преобразователя

Для устранения негативных моментов, выявленных на втором этапе разработки технологического маршрута изготовления УЧЭ туннельного датчика, в ходе последующих этапов необходимо:

- после соответствующих теоретических расчетов произвести коррекцию топологического рисунка, направленную как на исключение электрических «закороток», так и на уменьшение степени «выпучивания» получаемых поликремниевых структур путем изменения их геометрии;
- ввести дополнительный изолирующий слой, исключающий электрическое сваривание слоев металлизации верхнего и нижнего уровней при их контакте в случае электростатического схлопывания;
- отказаться от использования «гофрировки» краев изготавливаемых структур по причине невозможности прохождения дорожек металлизации через рельеф рисунка гофров без обрывов на их краях;
- провести эксперименты по вытравливанию «жертвенного» слоя в перекисно-аммиачных растворах, обладающих большей селективностью травления ФСС (использование перекисно-

аммиачных растворов исключило бы подтравливание адгезионного подслоя и, следовательно, дало бы возможность для формирования рисунка нижней металлизации использовать пленку металлической платины);

- для выравнивания поверхности жертвенного слоя использовать операцию химико-механической планаризации;
- во избежание дополнительного изгиба свободных поликремниевых диафрагменных и балочных структур исключить нанесение слоя верхней металлизации (и, следовательно, изолирующего напряженного слоя нитрида) по всей площади структуры, ограничившись лишь небольшой областью непосредственно над иглой.

Проект сопроводительного листа технологического маршрута третьего этапа разработки приведен в Приложении 5.

ГЛАВА 4. БЕСКОНТАКТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Интерференционные оптические методики контроля смещений диффузно отражающих микрообъектов

В данной главе описывается голографическая интерференционная методика измерения смещений и деформаций диффузно отражающих микрообъектов и проведение на ее основе экспериментальных исследований, направленных на измерение упругих параметров конструкционных материалов, используемых в разрабатываемом УЧЭ.

Необходимость проведения подобных исследований обусловлена тем, что упругие параметры используемых пленок (в частности, поликремниевых пленок), используемых при изготовлении широкого спектра МЭМС, такие как модуль упругости или коэффициент Пуассона, находятся в тесной зависимости от технологического маршрута, выполняемого при изготовлении изделия [73÷75]. Следовательно, для успешного моделирования напряженно-деформированного состояния УЧЭ туннельного датчика, а также для проверки этих моделей на адекватность, требуется создание новых или привлечение уже существующих экспериментальных методик измерения упругих констант материалов МЭМС. Кроме того, существует необходимость в универсальных методиках неразрушающего выходного контроля параметров изготавливаемых МЭМС, дающих возможность бесконтактно и с высокой

точно определять смещения и деформации изготовленных структур под действием прилагаемых нагрузок.

В литературе описан ряд методов, позволяющих решать эти задачи [71, 72, 114÷118]. Важное место среди них занимают оптические методы, такие, например, как лазерная интерферометрия [116÷118].

Достаточно известный способ измерения смещений и деформаций различных объектов под действием заданных нагрузок (а, следовательно, и их упругих свойств) – голографическая интерферометрия [119÷122]. Ее методы имеют ряд преимуществ по сравнению с методами классической интерферометрии:

- Дефекты оптической схемы (царапины на зеркалах и др.) слабо влияют на результат, так как луч проходит дважды один и тот же путь, и только изменение исследуемого объекта изменяет интерференционные картины.

- Возможность исследования диффузно отражающих объектов.

- Возможность определения смещений и деформаций разного рода (сдвиг по разным осям, различные упругие деформации, температурное расширение и т. д.) при помощи одной и той же экспериментальной установки, без внесения существенных изменений в ее конструкцию.

Описаний использования методов голографической интерферометрии для измерения смещений и деформаций элементов МЭМС в литературе найдено не было.

В главе описываются:

- разработка методик определения упругих свойств материалов МЭМС посредством голографических измерений смещений и деформаций специальных тестовых структур под действием заданных нагрузок;

- создание экспериментальной установки, предназначенной для реализации этих методов, и проведение экспериментов.

Принцип голографического метода регистрации смещений и деформаций непрозрачных объектов состоит в интерферометрическом сравнении двух световых полей, рассеянных объектом в разное время – до и после его изменения. По крайней мере одно из этих полей должно быть восстановлено голографическим способом.

Для измерения упругих констант материалов МЭМС необходимо использование специальных тестовых объектов, изготовленных из этих материалов по технологии, принятой при производстве изделий, в которых эти материалы применяются. Тестовые объекты, используемые для измерения модуля Юнга материала, представляют собой микромеханические структуры простой формы – консольные балки и прямоугольные мембраны, имеющие размеры от десятых долей до единиц миллиметров. При помощи методов голографической интерферометрии возможно зарегистрировать величину их непосредственного прогиба под действием известной нагрузки – электростатического притяжения, вызванного подачей постоянной разности потенциалов V между проводящим нижним слоем балки или мембраны и расположенным под ней отклоняющим электродом с точностью до десятых долей микрона. На рис.4.1 изображена характерная интерферограмма, возникающая при прогибе консольной балки.

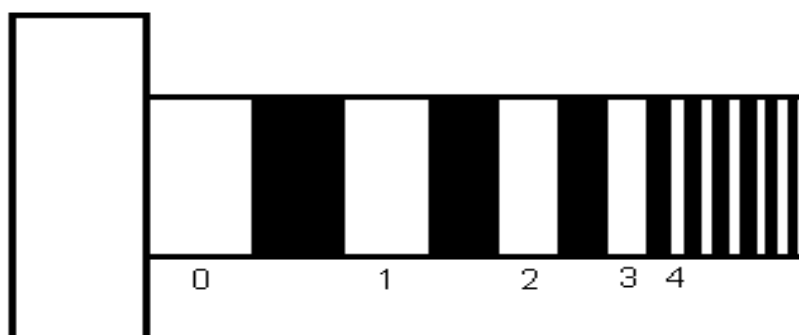


Рис. 4.1. Характерная интерференционная картина, возникающая при прогибе консольной балки

В случае использования консольной балки в качестве тестового объекта, для модуля Юнга материала верна формула (малые прогибы):

$$E = \frac{V^2 l^4}{d^2 h^3} \frac{(1 + \cos \alpha)}{16 \lambda N}, \quad (4.1)$$

где p_0 – нагрузка, V – прикладываемая электрическая разность потенциалов, l , b и h – соответственно длина, ширина и толщина консольной балки, d – расстояние между отклоняющим электродом и нижним слоем балки, α – угол падения предметного пучка на объект наблюдения, N – порядок крайней полосы (определяется из эксперимента), λ – длина волны используемого излучения.

Для проведения измерений предлагается схема, приведенная на рис.4.2. Свет от гелий -неонового лазера ЛГ делится на предметный и

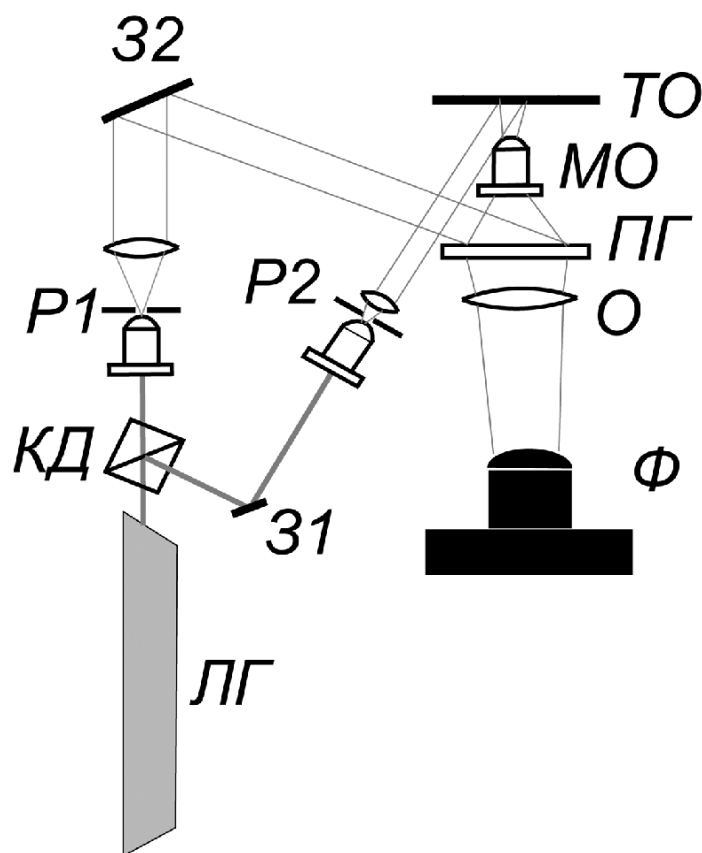


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

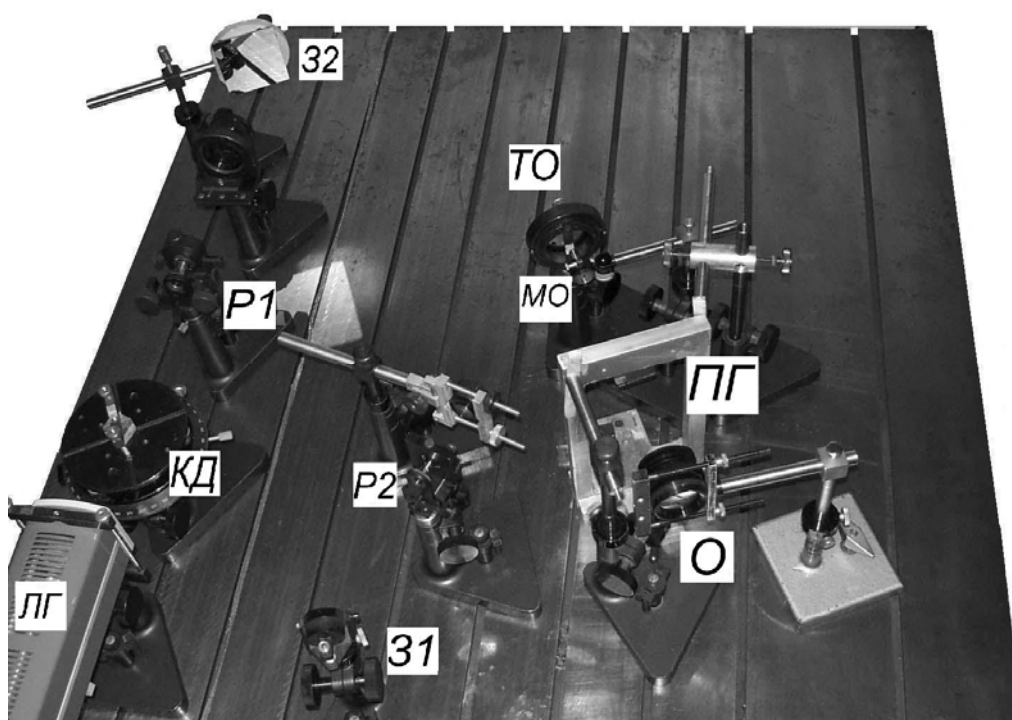


Рис. 4.3. Общий вид экспериментальной установки

опорный пучки посредством делителя *КД*, зеркала *31* и расширительных систем *P1* и *P2*. Предметный пучок рассеивается тестовым объектом и, пройдя через микрообъектив *МО*, попадает на фотопластинку *ПГ*, на которую также посредством зеркала *32* подается опорный пучок. Изображение объекта и получаемые интерферограммы можно наблюдать с помощью системы наблюдения *О-Ф*. На описанной схеме могут быть реализованы как метод двойной экспозиции, так и метод реального времени, однако в случае последнего требуется обработка фотоматериала «на месте экспонирования» [123÷127].

На описанной экспериментальной установке были проведены тестовые эксперименты по определению величины смещения диффузно отражающего объекта как целого в его плоскости. Смещение производилось при помощи микровинтов.

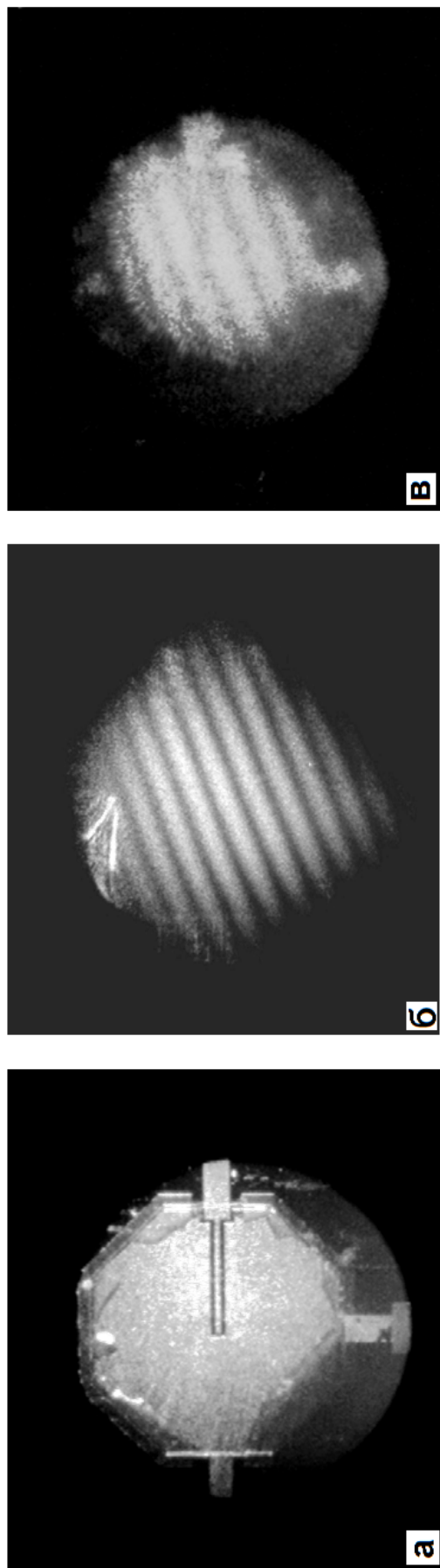


Рис. 4.4.

а – исследуемый объект;
б – интерференционные полосы, образовавшиеся в результате сдвига объекта в его плоскости при помощи микровинта на 2 мкм (локализованы за объектом);
в – при фотосъемке с малой апертурой системы наблюдения – изображение объекта, покрытое полосами

В общем случае плоскость локализации интерференционных полос в голографической интерферометрии может не совпадать с плоскостью объекта. В частности, при сдвиге объекта как целого полосы локализуются в бесконечности, то есть могут наблюдаться в фокальной плоскости линзы. По расстоянию между полосами можно судить о величине смещения объекта. Отметим, что могут также возникать паразитные полосы из-за случайного смещения голограммы в процессе обработки. Наличие паразитных полос делает невозможным настройку на полосу бесконечной ширины. Наблюдаемые интерферограммы изображены на рис.4.4.

Полосы, формирующиеся при трансляции объекта как целого, локализованы на бесконечности, то есть наблюдаются в задней фокальной плоскости линзы (рис.4.5).

Величину смещения объекта можно оценить по формуле

$$L_x = f \frac{\lambda}{d_{fp}}, \quad (4.2)$$

где λ – длина волны излучения, d_{fp} – измеренное расстояние между полосами, f – фокусное расстояние системы наблюдения.

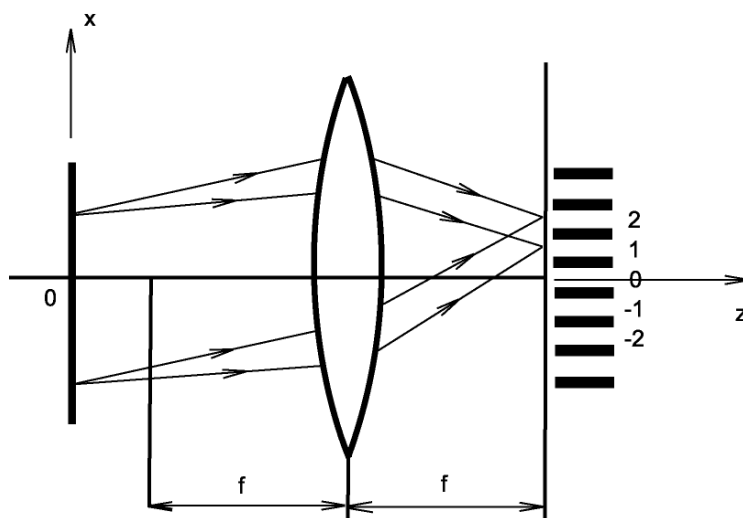


Рис. 4.5. Образование интерференционных полос при трансляции объекта

Полученные полосы перпендикулярны вектору смещения. Таким образом, по ориентации полос можно определить направление сдвига, а по расстоянию между ними – величину сдвига. По результатам эксперимента $d_{fp} = 0.15 \pm 0.01$ мм. Следовательно, $L_x = (2.1 \pm 0.1) \cdot 10^{-4}$ см. При помощи микровинта объект смещался на 2 ± 0.5 мкм.

4.2. Применение методов голографической интерферометрии повышенной чувствительности для контроля микросмещений диффузно отражающих элементов микро- и наномеханических устройств

Суть методик, нашедших применение в задачах определения упругих констант материалов, используемых в микромеханических устройствах, обычно сводится к изготовлению специальных тестовых структур и последующему их испытанию. Как правило, в справочной литературе наряду со значением какой-либо константы материала указывается способ ее измерения [102]. Это связано с тем, что измеренные разными методами параметры могут отличаться друг от друга в зависимости от размера тестовой структуры, способа, направления и амплитуды ее отклонения. Кроме того, каждый метод имеет свою предельную точность.

Поэтому необходимо, чтобы амплитуды возбуждения, а также размеры были для тестовых структур и элементов разрабатываемых МЭМС, по меньшей мере, одного порядка величины.

При малых напряжениях амплитуда электростатического отклонения используемых в качестве тестовых объектов консольных балок приблизительно пропорциональна квадрату напряжения. Эксперименты и

подробные расчеты показали, что как только конец балки переместится приблизительно на треть своего пути в направлении отклоняющего электрода, положение балки станет неустойчивым, и она самопроизвольно переместится на остальное расстояние в результате быстрого возрастания электростатических сил на ее конце (см. гл.2).

В частности, этим объясняется необходимость применения прецизионных методик измерения механических смещений. При помощи метода голографической интерферометрии повышенной чувствительности, основанного на интерференции высших гармоник, дифрагированных нелинейной голограммой [128], возможно весьма точное измерение прогибов тестовых под действием электрического поля много меньше порогового.

Предлагаемая к применению методика [129÷134] состоит из трех стадий. Первая из них заключается в регистрации двукратно экспонированной голограммы тестовой структуры с помощью внеосевой голографической схемы, причем угол падения предметного пучка на объект исследования различен для первой и второй экспозиций. Вторая стадия состоит в фотографировании восстановленного изображения на второй пластине, это изображение содержит интерференционные полосы, возникающие как из-за деформации структуры, так и из-за перемены угла падения предметного пучка. После проведения процесса нелинейного проявления пластины она превращается в модулированную дифракционную решетку, и можно рассматривать ее как нелинейную голограмму. На третьей стадии полученная таким образом решетка освещается двумя плоскими волнами, и, при помощи диафрагмы выбираются лишь сопряженные высшие гармоники, которые и интерферируют. По полученной интерферограмме можно с повышенной точностью определить величину смещения тестовых структур.

Схема экспериментальной установки, предназначенной для определения микросмещений тестовых объектов, приведена на рис.4.6.

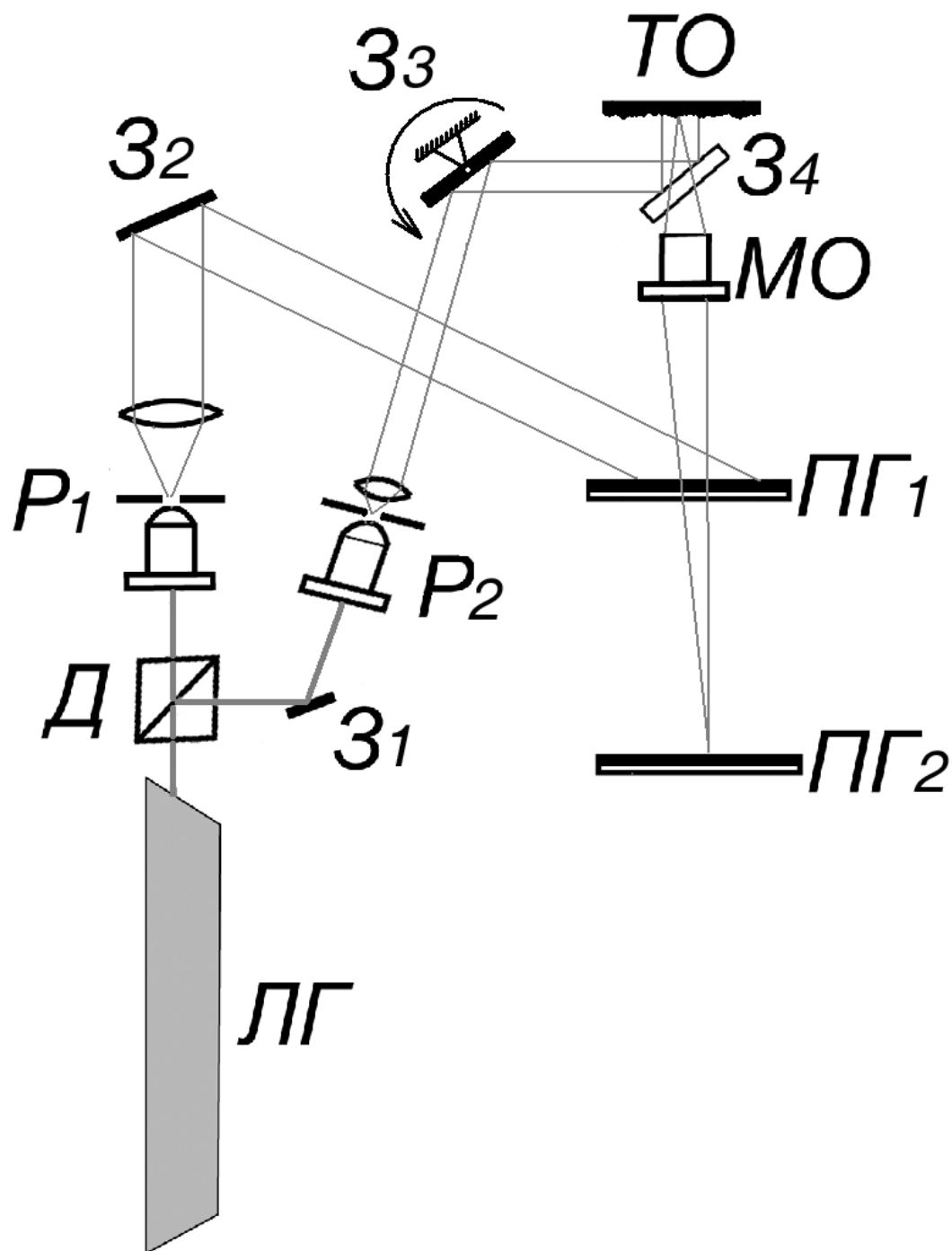


Рис. 4.6. Схема записи голограмм при использовании интерферометрии повышенной чувствительности

Свет от гелий-неонового лазера *ЛГ* делится на предметный и опорный пучки посредством делителя *Д*, зеркала *З1* и расширительных систем *Р1* и *Р2*. С помощью зеркала *З2* опорный пучок подается на фотопластинку *ПГ1*. Предметный пучок попадает на тестовый объект посредством полупрозрачного зеркала *З4* и зеркала *З3*, которое может поворачиваться для обеспечения перемены угла падения предметного пучка на тестовый объект между первой и второй экспозициями. Рассеянное тестовым объектом излучение, пройдя через микрообъектив *МО*, попадает на фотопластинку *ПГ1*. Возмущение амплитуды диффузно отраженного пучка в точке (x, y) плоскости объекта во время первой экспозиции описывается следующим образом:

$$U_1(x, y) = U_0(x, y) \exp[ik\phi(x, y)], \quad (4.3)$$

где $U_0(x, y)$ – абсолютная амплитуда, $\phi(x, y)$ – профиль пучка, отраженного от объекта и содержащего микроскопические колебания высоты, $k = 2\pi / \lambda$.

Затем осуществляется деформация объекта, и зеркало *З3* поворачивается таким образом, что пучок падает под небольшим углом β с направлением падения во время первой экспозиции. И возмущение амплитуды в плоскости объекта во время второй экспозиции можно записать следующим образом:

$$U_2(x, y) = U_0(x, y) \exp[ik(\phi(x, y) + \psi(x, y) + x \sin \beta)], \quad (4.4)$$

где $\psi(x, y)$ – сдвиг по фазе, обусловленный деформацией объекта. Падение предметного пучка на объект во время первой экспозиции предполагается нормальным. После экспонирования и проявления фотопластинка *ПГ1* вновь устанавливается на прежнее место и освещается опорной волной. Амплитуды дифрагированных полученной голограммой волн пропорциональны амплитудам пучков, диффузно отраженных

объектом во время первой и второй экспозиций и прошедших через микрообъектив *МО*.

На фотопластинке *ПГ2* формируется изображение полученной интерферограммы (в частности, если измеряется прогиб пластины или мембраны, интерференционные полосы будут локализованы в плоскости объекта, и на пластине *ПГ2* сформируется изображение объекта, промодулированное интерференционными полосами).

Освещенность пластины *ПГ2* составит:

$$I_{ПГ2} = a \left| \frac{1}{M} U_1(Mx, My) + \frac{1}{M} U_2(Mx, My) \right|^2. \quad (4.5)$$

Здесь a – постоянная величина, M – увеличение микрообъектива *МО*. Что после замены переменных $\xi = Mx; \eta = My; b = 2a / M^2$ примет вид:

$$I_{ПГ2} = b |U_0(\xi, \eta)|^2 \{1 + \cos k(\psi(\xi, \eta) + \xi \sin \beta)\}. \quad (4.6)$$

Подобная картина интенсивности могла бы возникнуть при интерференции двух волн, одна из которых проходит через воображаемый фазовый объект со сдвигом по фазе $\psi(\xi, \eta)$, а другая представляет собой плоскую волну.

Если проявление фотопластинки *ПГ2* осуществлено нелинейным способом, то ее амплитудное пропускание после проявления можно описать выражением:

$$T(\xi, \eta) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \exp i m k \{\psi(\xi, \eta) + \xi \sin \beta\}. \quad (4.7)$$

Здесь C_m представляет собой абсолютное амплитудное пропускание дифрагированной волны m -го порядка.

Из последнего выражения следует, что пластина *ПГ2* может рассматриваться в качестве нелинейной голограммы, несущая частота которой равна $(\sin \beta) / \lambda$. Когда такая голограмма освещена плоской

волной, происходит дифракция многих высших гармоник, каждая из которых имеет сдвиг по фазе $m\psi(\xi, \eta)$.

Пусть теперь голограмма, полученная нелинейным проявлением фотопластинки ПГ2, освещена двумя плоскими когерентными волнами, как показано на рис.4.7. Тогда во фраунгоферовой плоскости объектива О, размещенного за голограммой ПГ2, возникает два набора спектров Фурье. При изменении направлений падающих на фотопластинку ПГ2 волн μ -й дифракционный порядок от одной волны может совпасть во фраунгоферовой плоскости с ν -м дифракционным порядком от другой волны. С помощью фильтрующей системы (узкой диафрагмы), установленной во фраунгоферовой плоскости объектива О, осуществляется селекция только этих двух волн, после чего они интерферируют. Следовательно, распределение интенсивности I в выходной плоскости S имеет вид:

$$I_{\text{ВЫХ}} = d + e \cos(k(\mu + \nu)\psi(x_{\text{ВЫХ}}, y_{\text{ВЫХ}})), \quad (4.8)$$

где d, e – константы, определяемые по абсолютным амплитудам μ -го и ν -го порядков дифракции и увеличению объектива О. Последнее уравнение показывает, что сдвиг по фазе $\psi(x, y)$, обусловленный деформацией объекта, усилен, и чувствительность повышена в $(\mu + \nu)$ раз по сравнению

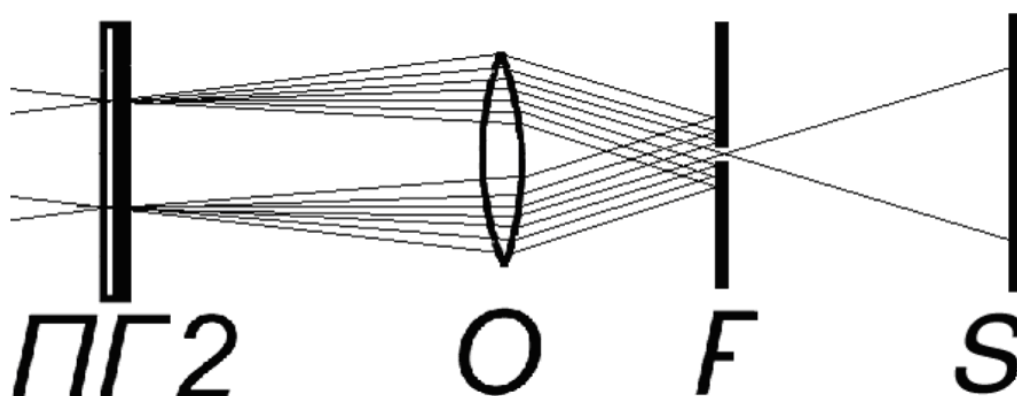


Рис. 4.7. Образование интерференционных полос при трансляции объекта

с обычной голографической интерферометрией. На рис.4.8 схематически изображены выходные интерферограммы, получаемые в случае измерения прогиба тестовой структуры - консольной балки описанным способом при разных значениях μ и ν в сравнении с интерферограммой, соответствующей случаю использования традиционной голографической интерферометрии.

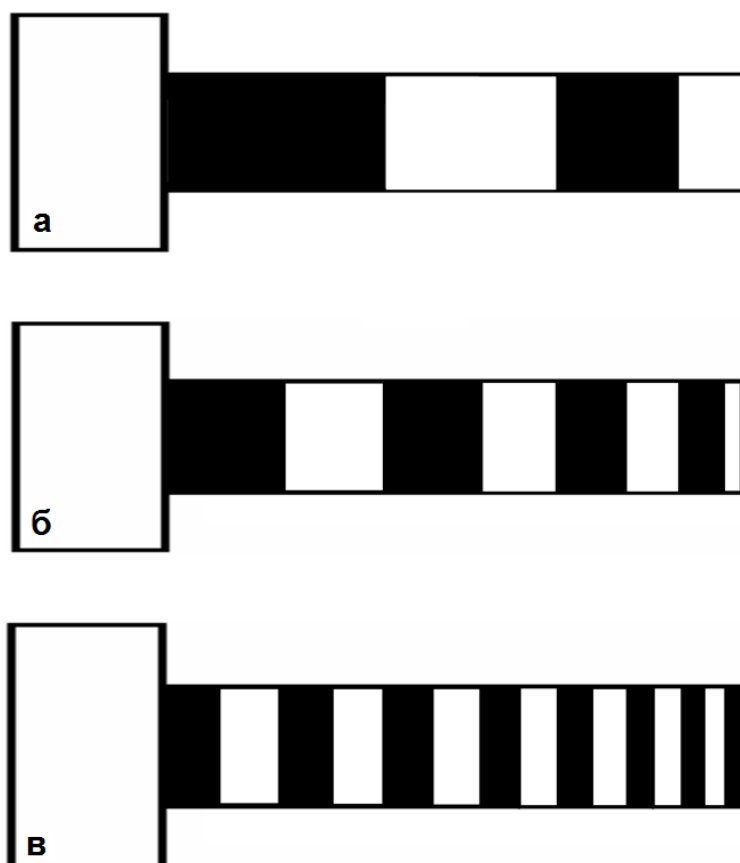


Рис. 4.8. Характерные интерферограммы, возникающие при прогибе консольной балки (прогиб одинаков для всех интерферограмм):
а – случай использования традиционной голографической интерферометрии;
б – измерение по описанной методике, $\mu=2$, $\nu=2$;
в – измерение по описанной методике, $\mu=4$, $\nu=4$

Применение цифровых методов регистрации позволит реализовать данный метод без второй и третьей стадий. Голограмма, зарегистрированная на матричном приемнике, может быть введена в компьютер, и дальнейшее восстановление волнового поля осуществляется математически, при этом отдельно может быть выделено как амплитудное, так и фазовое распределение восстановленного поля. Фазовое распределение поля в плоскости восстановленного изображения (фазовое изображение) содержит большой объем информации о существенных физических свойствах объекта: вариациях толщины, смещениях, деформациях и т.п. Это, по сути, та же информация об объекте, которую можно извлечь методами интерферометрии, однако непосредственное прямое отображение фазы устраняет необходимость в интерференционном анализе изображения.

Однако, цифровая регистрация, помимо своих преимуществ (оперативность записи, отсутствие химических процессов), обладает рядом специфических особенностей, связанных с негативным влиянием периодической структуры регистратора, вызывающих появление паразитных пространственных частот и делающих невозможным корректное восстановление информации о записанном волновом фронте в случае внеосевой голографической схемы, подразумевающей наличие несущей в распределении интенсивности в плоскости регистратора.

Поэтому для построения голографической установки, осуществляющей цифровую регистрацию волновых фронтов с последующей компьютерной обработкой, необходима реализация специфических оптических схем, реализующих, например, т.н. «метод фазовых шагов» [135], свободный от названного недостатка, и позволяющий осуществлять прецизионные измерения смещений и деформаций диффузно отражающих микрообъектов с точностью до тысячных долей длины волны используемого излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить следующее.

Разработка технологии изготовления твердотельных интегральных микро- и наномеханических преобразователей, допускающих однокристалльную интеграцию с электронными схемами управления, съема и предобработки сигнала, является необходимой задачей для решения научно-технических проблем, стоящих перед отечественной микро- и наноэлектроникой.

Предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния УЧЭ туннельного преобразователя сложной геометрии, построенная на основе метода конечных элементов и позволяющая теоретически оценивать жесткостные свойства УЧЭ любого типа.

Усовершенствована модель эффекта схлопывания электродов преобразователя, в части учета силовых взаимодействий, проявляющихся на малых расстояниях. В рамках данной модели для нескольких вариантов электростатических актюаторов проанализирован метод подавления электростатического схлопывания, основанный на использовании последовательно включенной емкости. Результаты расчетов для двух типов актюаторов показали невозможность расширения диапазона прохода подвижного электрода на всю величину межэлектродного зазора, обусловленную силовыми взаимодействиями, наблюдаемыми на субмикронных расстояниях (силы Казимира). Тем не менее, наилучшие результаты указанный метод показал для актюаторов консольного типа, соответствующих простейшей из рассматриваемых моделей подвижного элемента преобразователя (пластина на упругом подвесе).

Предложен и реализован технологический маршрут изготовления чувствительного элемента туннельного преобразователя, основанный на базовых операциях технологии КМОП. В рамках реализации

предложенного маршрута отработаны следующие специальные технологические процессы:

- формирование электродов туннельного преобразователя на основе тугоплавкого материала – силицида платины, обладающего по сравнению с прочими материалами рядом преимуществ, таких как химическая и термическая стойкость и необходимые туннельные характеристики;
- формирование ультраострых кремниевых «игл» с высотой 1,5 мкм и радиусом закругления острия порядка 10 нм;
- формирование свободных диафрагм методом травления «жертвенного слоя».

Проведенные СТМ эксперименты подтвердили приемлемость туннельных характеристик силицида платины для его использования в качестве электродного материала чувствительного элемента преобразователя. Однако эксперименты по измерению сопротивления растекания (АСМ с проводящим кантилевером) показали, что после термообработки при температуре 850°C материал практически полностью теряет свои проводящие свойства из-за выхода на поверхность зерен кремния и последующего их окисления в процессе перекристаллизации силицидной пленки. Исходя из данных результатов было рекомендовано для выравнивания поверхности «жертвенного слоя» использовать операцию химико-механической планаризации, что позволяет обойтись без высокотемпературных обработок. Другое приемлемое решение состоит в использовании в качестве жертвенного слоя борофосфоросиликатное стекло, имеющее температуру оплавления ниже температуры плавления эвтектики силицида платины (830°C).

Реализованы голографические интерференционные методики определения упругих свойств подвижных элементов МЭМС путем точного измерения микросмещений диффузно отражающих объектов под

действием известных нагрузок. Проведенные эксперименты позволили измерить величину смещения диффузно отражающего микрообъекта как целого в его плоскости с точностью 0,1 мкм. Анализ интерферометрических методов с использованием гармоник высших порядков, дифрагированных нелинейной голограммой, а также цифровых голографических методов показал, что их применение позволяет повысить точность измерения смещений изучаемых объектов до единиц нанометров.

Представленные в монографии конструктивные и технологические решения, позволяют создать принципиально новые твердотельные приборы на основе квантовых эффектов – монолитные туннельные нанопреобразователи. На основе таких приборов могут быть построены измерительные системы нового поколения (акустические, акселерометрические и т.д.), обладающие повышенной чувствительностью и широким динамическим диапазоном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Petersen K.E. Silicon as a mechanical material //Proc. IEEE, 70(5), 420-457 (May 1982).
2. Jerman H., Terry S. Sensors and Actuators /Ed. by P. Rai-Choudhury, Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, vol.2: Micromachining and Microfabrication, p. 379, ISBN 0-8194-2379-3, SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1997.
3. Ed. by Mohamed Gad-el-Hak, The MEMS Handbook. CRC Press. 2002.
4. Fedder G. Integrated MEMS in Conventional CMOS // Proc. of the NSF/ASME Workshop on Tribology Issues and Opportunities in MEMS, Kluwer Academic Publishers, November, 1997.
5. Smith, J.H., et. al. Embedded micromechanical devices for the monolithic integration of MEMS with CMOS // Proc. of International Electro Devices Meeting, pp. 609-12, Dec. 1995.
6. Нестеров В.Е., Рубцов В.И., Рубцов И.В. Современная зарубежная военная микро- и мини- робототехника // Микросистемная техника, 3, 2000.
7. Васильев А.А., Климов Д.М., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника, 1, 1999.
8. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника, 1, 1999.
9. <http://www.analog.com/>
10. <http://www.freescale.com/>
11. <http://www.ti.com/>

12. Шурыгина В. Долгожданные МЭМС: технология малых форм // Электроника: Наука, Технология, Бизнес №4, 2002.
13. Варадан В., Виной К., Джозе Л. ВЧ МЭМС и их применения / М., Техносфера, 2004.
14. Телец В.А. Микромеханические инерционные преобразователи физических величин: типовые варианты исполнения // Микросистемная техника №2, 2004.
15. Ed. by Hyungsuck Cho, Opto-Mechatronic Systems Handbook: Techniques and Applications. CRC Press. 2003.
16. Лучко В.А. МЭМС-технология переворачивает представления о технике инфракрасного видения // Микросистемная техника №2, 2004.
17. Allan R. New application open up for silicon sensors: a special report // Electronics. 1980. Vol. 53. №24. P. 113-122.
18. Eloy J.-C. Status of the MEMS Industry: from Devices to Equipment and Materials Markets // SEMI MEMS/MST Conference. Moscow. 2005.
19. Emerging MEMS: Technologies & Market, Yole Developpement 2010 Report.
20. Lal A. Application of Micromachining to nanotechnology /Ed. by H.S. Nalwa, Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, vol.1: Synthesis and Processing, p. 579, ISBN 0-12-51361-3, Academic Press, New York, 2000.
21. Prorok B.C., Zhu Y., Espinosa H.D., Guo Z., Bazant Z.P., Zhao Y., Yakobson B.I. Micro- and Nanomechanics // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, edited by H. S. Nalwa. American Scientific Publishers. 2004. Vol. 5. P. 555-600.
22. Binning G., Rohrer H. Scanning tunneling microscopy. IBM J.Res.Develop. V.30. №4. P.355. 1986.

23. Дедков Г.В., Рехвиашвили С.Ш. Нанотрубки и силовые взаимодействия в атомно-силовом микроскопе // ЖТФ. Том 69. Вып.8. 1999.
24. Рехвиашвили С.Ш. Особенности силовых взаимодействий в бесконтактном режиме атомно-силового микроскопа // Письма в ЖТФ. Том 26. Вып.12. 2000.
25. Ilic B., Yang Y., Craighead H.G. Virus Detection Using Nanoelectromechanical Devices // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. P. 2604-2606.
26. Ilic B., Craighead H.G., Krylov S., Senaratne W., Ober C., Neuzil P. Attogram Detection Using Nanoelectromechanical Oscillators // J. of Appl. Phys. 2004. Vol. 95. P. 3694-3703.
27. Pescini L., Lorenz H., Blick R.H. Mechanical gating of coupled nanoelectromechanical resonators operating at radio frequency // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82(3). P. 352-354.
28. Blick R.H., Sheible D.V. A quantum electromechanical device: the electromechanical single-electron pillar // Superlattices and Microstructures. 2003. Vol. 33. P. 397-403.
29. DiLella D., Whitman L.J., Colton R.J., Kenny T.W., Kaiser W.J., Voth E.C., Podosek J.A., Miller L.M. A Micromachined Magnetic-Field Sensor Based on an Electron Tunneling Displacement Transducer // Sensors and Actuators, 86 (2000), pp. 8-20.
30. Kenny T.W., Kaiser W.J., Waltman S.B., Reynolds J.K. Novel Infrared Detector Based on a Tunneling Displacement Transducer // Applied Physics Letters, 59(15), 7(1991).
31. Kenny T.W., Kaiser W.J., Rockstad H.K., Reynolds J.K., Podosek J.A. Wide-Bandwidth Electromechanical Actuators for Tunneling Displacement Transducers// Voth, Journal of microelectromechanical systems, vol. 3 No.3 Sept. 1994.

32. Rockstad H.K., Kenny T.W., Kelly P.J., and Gabrielson T.B. A Micro-Fabricated Electron-Tunneling Accelerometer as a Directional Acoustic Sensor// Proceedings of Acoustic Particle Velocity Sensors: Design, Performance and Applications 9/95. Published in AIP Conf. Proc. 368. 57. 1996.
33. Rockstad H.K., Tang T.K., Reynolds J.K., Kenny T.W., Kaiser W.J. and Gabrielson T.B. A Miniature, High-Sensitivity, Electron Tunneling Accelerometer // Sensors and Actuators A 53. P.227-231. 1996.
34. Kenny T. Nanometer-Scale Force Sensing with MEMS Devices // IEEE Sensors Journal, vol.1, № 2, 2001.
35. Rockstad H.K., Kenny T.W., Kelly P.J., and Gabrielson T.B. A Microfabricated Electron-Tunneling Accelerometer as a Directional Acoustic Sensor// Proceedings of Acoustic Particle Velocity Sensors: Design, Performance and Applications 9/95 Published in AIP Conf. Proc. 368, 57 (1996).
36. Liu C.H. and Kenny T. A High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer // Journal of microelectromechanical systems, vol.10, № 3, 2001.
37. Шашкин В.И., Востоков Н.В., Випилкин Н.А., Климов А.Ю., Волгунов Д.Г., Рогов В.В., Лазарев С.Г. О возможных конструкциях датчиков туннельно-эмиссионных акселерометров // Микросистемная техника, 5, 2003.
38. Kobayashi D., Hirano T., Furuhashi T., Fujita H. An Integrated Lateral Tunneling Unit // Proc. MEMS Workshop. Travemünde, Germany. P. 214-219. Feb. 1992.
39. Hartwell P.G., Bertsch F.M., Miller S.A., Turner K.L., MacDonald N.C. A Single-Mask, Lateral MEMS Tunneling Accelerometer // 11th Annual International Workshop on MEMS. P.340-344, 1998.

40. Kubena R.L., Atkinson G.M., Robinson W.P., Stratton F.P. A new miniaturized surface micromachined tunneling accelerometer. //IEEE Electron Device Lett. Vol.17. № 6. P.306-308. 1996.
41. Kubena R.L., Vickers-Kirby D.J., Joyce R.J., Stratton F.P. A new tunneling-based sensor for inertial rotation rate measurement. // J. of MEMS. Vol. 8. No. 4. P.439-447. 1999.
42. Wang J., Xue W., Seetala N. V., Nie X., Meletis E. I., Cui T. A Micro-machined Wide-Bandwidth Magnetic Field Sensor Based on All-PMMA Electron Tunneling Transducer // IEEE Sensors Journal. 2006. Feb. V. 6. No. 1. pp. 97-105.
43. Shashkin V.I., Vostokov N.V., Vopilkin N.A., Klimov A.Y., Volgunov D.G., Rogov V.V., Lazarev S.G. High-Sensitivity Accelerometer Based on Cold Emission Principle // IEEE Sensors Journal. 2004. Apr. V. 4. No 3. pp. 92-101.
44. Wang J. Vertical Polymer Tunneling Sensor Platform by Hot Embossing Technique. Ph.D. dissertation. Inst. Micromanufact., Louisiana Tech. Univ. Ruston. 2003.
45. Митрофанов В.П., Якимов В.Н. Стандартный квантовый предел при измерении малых сил с использованием туннельного датчика // Вестник МГУ, сер.3 физика, астрономия, т.30, №4, стр.36-41, 1989.
46. Гусев А.В., Мележников И.В. Минимальный коэффициент шума туннельного датчика перемещений // Радиотехника и электроника (1990), 35(9), 2009-2013.
47. Simmons J. General Formula for Electric Tunnel Effect Between Similar Electrodes Separated by Thin Insulating Film // J. Appl. Phys. 34, 1963.
48. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. / М.: Наука, 1966.

49. Модинос А. Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия. / М.: Мир, 1990.
50. Вольф Е.Л. Принципы электронной туннельной спектроскопии // «Наукова думка», Киев, 1990.
51. Young R.D. Field Emission Ultramicrometer // Review of Scientific Instruments, vol.37, Issue 3, pp. 275-278, 1966.
52. Marques M.L, Serena P.A., Nicolaescu D., Itoh J. Modeling of a pressure sensor based on an array of wedge emitters // Applied Surface Science, 146. P.239. 1999.
53. Nicolaescu D. Modeling of the field emitter triode (FET) as a displacement/pressure sensor // Applied Surface Science. 87/88. P.61. 1995.
54. Iyer S.S., Auberton-Herve A.J. Silicon wafer bonding technology: for VLSI and MEMS applications / Institution of Electrical Engineers. London. 2002.
55. Калугин В.В. Исследование и разработка процессов подготовки поверхности кремниевых пластин при изготовлении структур «кремний на изоляторе». // Диссертация на соискание ученой степени к. т. н. М. МИЭТ (ТУ). 2001.
56. Matsumoto Y., Iwakiri M., Tanaka H., Ishida M., Nakamura T. A capacitive accelerometer using SDB-SOI structure. // Sensors and Actuators A. Vol. 53. P.267–272. 1996.
57. Shaw K.A., Zhang Z.L., MacDonald N.C. SCREAM-I: A single-mask, single-crystal silicon, reactive ion etching process for microelectromechanical structures // Sensors and Actuators A. Vol. 40. P.63-70. 1994.
58. Blauw M.A., Zijlstra T., van der Drift E. Balancing the etching and passivation in time-multiplexed dry etching of silicon // J. vac. Sci. technol. B. Vol. 19. P. 2930-2934. 2001.

59. Blauw M.A., Craciun G., Sloof W.G., French P.J., van der Drift E. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silicon structures // J. vac. Sci. technol. B. Vol. 20 P.3106-3110. 2002.
60. www.svmi.com
61. Hirano T., Furuhashi T., Gabriel K.J., Fujita H. Design, Fabrication, and Operation of Submicron Gap Comb-Drive Microactuators // J. of MEMS. Vol.1. No 1. P.52. 1992.
62. Балан Н.Н., Ивашов Е.Н., Невский А.Б. Методы минимизации внутренних напряжений сжатия в поликремниевых подвижных элементах МЭМС // 12-я Международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: Сб. науч. тр. конф., Ульяновск, 14-17 ию-ня 2010 г. – Ульяновск: УлГУ, 2010. – С. 248.
63. Балан Н.Н., Ивашов Е.Н., Невский А.Б. Использование пленок силицида платины в качестве материала металлизации электродов монокристаллических туннельных сенсоров // 12-я Международная конференция «Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы»: Сб. науч. тр. конф., Ульяновск, 14-17 июня 2010 г. – Ульяновск: УлГУ, 2010. – С. 246.
64. Balan N.N., Ivashov E.N., Nevsky A.B. Platinum silicide as electrode material of microfabricated quantum electron tunneling transducers // 11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM-2010: Book of abstracts, 30jun.-4jul. 2010. – Novosibirsk, Russia: IEEE, 2010. – P. 159-164.
65. Балан Н.Н., Ивашов Е.Н., Невский А.Б. Применение силицидных проводящих слоев в элементах МЭМС и НЭМС // 7-я Международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники»: Сб. науч. тр. конф., СПб., 28 июня-1 июля 2010 г. – Санкт-Петербург: ФТИ им. Иоффе РАН, 2010. – С. 120.

66. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / М. Мир 1975.
67. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки / М., «Наука», 1966.
68. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики / Гос. издательство технико-теоретической литературы М.-Л., 1951.
69. Коренев Б.Г. Введение в теорию бесселевых функций / М., «Наука», 1971.
70. Балан Н.Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур // Микросистемная техника №2, 2004.
71. Taechung Yiand and Chang-Jin Kim. Measurement of mechanical properties for MEMS materials. Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 706–716.
72. David Herman, Michael Gaitan , and Don DeVoe. MEMS Test Structures for Mechanical Characterization of VLSI Thin Films. // Proc. SEM Conference, Portland Oregon, June 4-6 2001.
73. Wolf S., Tauber R.N. Silicon Processing for the VLSI Era / vol.1, Lattice Press, Sunset Beach, CA, 1986.
74. Vossen J.L. Thin Film Processes / Academic Press, New York, 1978.
75. Maisel L.I., Glang R. Handbook of Thin Film Technology / McGraw-Hill, New York, 1970.
76. Бахвалов Н.С, Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах – математические задачи механики композиционных материалов / М., Наука, 1984.
77. Taylor G.I. The coalescence of closely spaced drops when they are at different electric potentials //Proc. Roy. Soc. A, 1968, v. 306, P. 423-434.
78. Ackerberg R.C. On a nonlinear differential equation of electrodynamics //Proc. Roy. Soc. A, 312 (1969), P. 129-140.

79. Nathanson H.C., Wickstrom R.A. A resonant-gate silicon surface transistor with high-Q bandpass properties // *Applied Physics Letters*, 1965, v.7, P. 84.
80. Nathanson H.C., Newell W.E., Wickstrom R.A., Davis J.R. The resonant-gate transistor // *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1967, v. ED-14, P. 117.
81. Алексенко А.Г., Балан Н.Н. Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов (pull-in instability) в МЭМС- и НЭМС-устройствах // *Нано- и микросистемная техника* №7, 2005.
82. Драгунов В.П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем // *Микросистемная техника*. №1. 2004.
83. Драгунов В.П. Нелинейность упругих элементов микромеханических систем // *Микросистемная техника*. №5. 2004.
84. Драгунов В.П. Нелинейная модель упругого элемента микромеханических систем // *Микросистемная техника*. №6. 2004.
85. Драгунов В.П. Нелинейная модель упругого элемента микромеханических систем // *Микросистемная техника*. 2004. №6. С.19-24.
86. Hung E.S., Senturia S.D. Leveraged bending for full-gap positioning with electrostatic actuation // *Technical Digest of Solid State Sensor and Actuator Workshop*. Hilton Head. 1998. P. 83-86.
87. Chu P.B., Pister S.J. Analysis of closed-loop control of parallel plate electrostatic microgrippers // *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Diego. May 1994. P. 820-825.
88. Busta H., Amantea R., Furst D., Chen J.M., Turowsky M., Mueller C. A MEMS shield structure for controlling pull-in forces and obtaining

- increased pull-in voltages //J. Micromech. Microeng. 2001. 11. P. 720-725.
89. Seeger J.J., Crary S.B. Stabilization of Electrostatically Actuated Mechanical Devices //Proc. of the 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. 1997. P. 1133-1136.
 90. Seeger J.J., Crary S.B. Analysis and Simulation of MOS Capacitor Feedback for Stabilizing Electrostatically Actuated Mechanical Devices //Second Int. Conf. on the Simulation and Design of Microsystems and Microstructures – MICROSIM97. 1997. P. 199-208.
 91. Chan E.K., Dutton R.W. Effects of Capacitors, Resistors and Residual Charge on the Static and Dynamic Performance of Electrostatically Actuated Devices //Proc. of SPIE. 1999. 3680. P. 120-130.
 92. Bernstein D., Guidotti P., Pelesko J.A. Analytical and numerical analysis of electrostatically actuated MEMS devices //Proc. of MSM. 2000. P.489-492.
 93. Pelesko J.A., Triolo A.A. Nonlocal problems in MEMS device control //J. Eng. Math. 2001. 41. 345-366.
 94. Pelesko J.A., Chen X.Y. Electrostatic deflections of circular elastic membranes //J. of Electrostatics. 2003. 57. P. 1-12.
 95. Шалимова К.В. Физика полупроводников /М. Энергоатомиздат, 1985.
 96. Masters N.D. and Ye W. Fast BEM Solution for Coupled 3D Electrostatic and Linear Elastic Problems //Proc. of the 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show. 2004. P. 426-429.
 97. Serry F.M., Walliser D., Maclay G.J. The role of the Casimir effect in the static deflection and stiction of membrane strips in microelectromechanical systems (MEMS) // Journal of applied physics. 1998. Vol. 84(5). P. 2501-2506.

98. Ding Jian-Ning, Wen Shi-Zhu, Meng Yong-Gang Theoretical study of the sticking of a membrane strip in MEMS under the Casimir effect // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. 11. P. 202-208.
99. Мостепаненко В.М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения // УФН. Том 156. Вып.3. 1988.
100. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии //Микросистемная техника. 2000. №1. С.21-33.
101. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Конструктивные и электрофизические характеристики датчиков силы в атомно-силовой микроскопии //Микроэлектроника. 1998. Том 27. №4. С.304-316.
102. <http://www.memsnet.org/material/>
103. Agache V., Ringot R., Bigotte P., Senez V., Legrand B., Buchailot L., Collard D. Modeling and experimental validation of sharpening mechanism based on thermal oxidation for fabrication of ultra-sharp silicon nanotips // IEEE Trans. on Nanotechnology. 2005. Vol. 4. №5. P. 548-554.
104. Djuzhev N. A., Beliaev S. N., Vlasenko V. A., Gogin A. A., Gontar V. M., Deniskin V. V., Mazaev A. A., Nevsky A. B., Tishin Y. I., Shokin A. N. A Silicon Gated Field Edge Cathode // The 16th International Vacuum Microelectronics Conference. 2003. Senri Life Science Center. Osaka. Japan.
105. C.W. Dyck, J.H. Smith, S.L. Miller, E.M. Russick, C.L.J. Adkins Supercritical carbon dioxide solvent extraction from surface-micromachined micromechanical structures // SPIE Micromachining and Microfabrication, Oct. 1996.

106. Mulhern G.T., Soane D.S. and Howe R.T. Supercritical Carbon Dioxide Drying of Microstructures // The 7th Int. Conf. On Solid-State Sens. And Act., Yokohama, Japan, June 7-10, 1993, pp.296-299.
107. Балан Н.Н. Резонансная модель чувствительной части акустических туннельных сенсоров // Научная сессия МИФИ-2002: Сб. науч. тр., Москва, 21-25 янв. 2002 г. – М. : МИФИ, 2002. – Т.4. – С. 189.
108. Балан Н.Н., Груздев А.О., Невский А.Б., Гаврин С.С. Контроль структурных и электрофизических свойств пленок SiPt-металлизации электродов туннельного датчика методами сканирующей зондовой микроскопии // Научная сессия МИФИ-2006: Сб. науч. тр., Москва, 23-27 янв. 2006 г. – М. : МИФИ, 2006. – Т.1. – С. 70-71.
109. Balan N.N., Gruzdev A.O., Nevsky A.B., Frolov V.D. SPM-control of structural and electrical properties for PtSi-layers of electrode metallization in tunneling sensor // International conference «Micro- and nanoelectronics -2005»: Book of abstracts, 3-7 oct. 2005. – Moscow Zvenigorod, Russia: SPIE, 2005. – P. PI-11.
110. Lin Wen-Hui, Zhao Ya-Pu. Nonlinear behavior for nanoscale electrostatic actuators with Casimir force // Chaos, Solitons and Fractals. 2005. Vol. 23. P. 1777-1785.
111. Алексенко А.Г., Балан Н.Н., Волков Ю.А. О динамическом поведении упругих элементов МЭМС-устройств в присутствии эффекта электростатического схлопывания - Нано- и микросистемная техника №2, 2008 стр. 47-53.
112. Балан Н.Н., Волков Ю.А. Моделирование работы НЭМС туннельного сенсора // Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях ММПЧН-2008»: Сб. науч. тр. конф., Москва, 12-14 марта 2008 г. – М.: МИФИ, 2008. – С. 26.

113. Балан Н.Н., Волков Ю.А. Численное моделирование МЭМС- и НЭМС-устройств с управлением электрическим полем // Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях ММПСН-2008»: Сб. науч. тр. конф., Москва, 12-14 марта 2008 г. – М. : МИФИ, 2008. – С. 48.
114. Balan N.N., Gavrin S.S., Gruzdev A.O., Morozov S.A. Probe metrology of MEMS-structures // International conference «Micro- and nanoelectronics -2005»: Book of abstracts, 3-7 oct. 2005. – Moscow Zvenigorod, Russia: SPIE, 2005. – P. OI-10.
115. Балан Н.Н., Груздев А.О., Обижаев Д.Ю., Гаврин С.С. Измерение модуля упругости балочных структур методами сканирующей зондовой микроскопии // Научная сессия МИФИ-2006: Сб. науч. тр., Москва, 23-27 янв. 2006 г. – М. : МИФИ, 2006. – Т.1. – С. 68-69.
116. Espinosa H.D., Prorok B.C., Fischer M. A Methodology for Determining Mechanical Properties of Freestanding Thin Films and MEMS Materials // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2003. V.51. No.1. P. 47-67.
117. Суминов В.М., Панфилова Е.Е., Смирнова Н.В. Исследование полупроводниковых чувствительных элементов различных конструкций методами лазерной интерферометрии / Автоматизация и современные технологии, 1993, №12, с. 21-23.
118. Суминов В.М., Панфилова Е.Е., Смирнова Н.В. Исследование чувствительных элементов полупроводниковых датчиков давления методами лазерной интерферометрии / Автоматизация и современные технологии, 1994, №1, с. 10-12.
119. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. / М.: Мир, 1982. – 504с.
120. Островский Ю.И., Щепинов В.П., Яковлев В.В. Голографические интерференционные методы измерения деформаций. / М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 248с.

121. Суминов В.М., Панфилова Е.Е., Смирнова Н.В. Исследование форм собственных колебаний резонирующих мембран частотных датчиков давления методами голографической интерферометрии / *Авиационная промышленность*, 1994, №3-4, с. 28-31.
122. Суминов В.М., Панфилова Е.Е., Смирнова Н.В., Петрушинин Е.Ю. Исследование форм собственных колебаний дна цилиндрических резонаторов частотных датчиков давления методами голографической интерферометрии / *Авиационная промышленность*, 1994, №5-6, с. 72-74.
123. Балан Н.Н., Груздев А.О., Маркилов А.А., В.Г. Родин, В.Г., Стариков С.Н. Голографический интерференционный микроскоп для измерения смещений микрообъектов // *Научная сессия МИФИ-2003: Сб. науч. тр., Москва, 27-31 янв. 2003 г. – М. : МИФИ, 2003. – Т.4. – С. 217-218.*
124. Балан Н.Н., Груздев А.О., Маркилов А.А. Использование голографического интерференционного микроскопа с фурье-каскадом для определения упругих констант поликремневых пленок // *Научная сессия МИФИ-2003: Сб. науч. тр., Москва, 27-31 янв. 2003 г. – М. : МИФИ, 2003. – Т.8. – С. 302-303.*
125. Балан Н.Н., Груздев А.О. Применение голографического интерференционного микроскопа для наблюдения гармонических колебаний объектов микромеханики // *Научная сессия МИФИ-2004: Сб. науч. тр., Москва, 26-30 янв. 2004 г. – М. : МИФИ, 2004. – Т.4. – С. 253-254.*
126. Балан Н.Н., Груздев А.О. Измерение упругих констант MEMS-материалов методом голографической интерферометрии // *4-я международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2005»: Тезисы докладов 4-й междунар. конф., Санкт-*

Петербург, 17-21 окт. 2005 г. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2005. – С. 202-203.

127. Балан Н.Н. Голографическая микрометрия подвижных элементов MEMS-структур // Микросистемная техника №12, 2003.
128. Toyooka S. Holographic interferometry with increased sensitivity for diffusely reflecting objects // Applied Optics. 1977. V.16. №4. P.1054-1057.
129. Балан Н.Н., В.Г. Родин, В.Г., Стариков С.Н. Измерение микросмещений MEMS-структур методом голографической интерферометрии повышенной чувствительности // Научная сессия МИФИ-2004: Сб. науч. тр., Москва, 26-30 янв. 2004 г. – М. : МИФИ, 2004. – Т.4. – С. 250-252.
130. Балан Н.Н., В.Г. Родин, В.Г., Стариков С.Н. Измерение упругих констант MEMS-материалов при помощи голографической интерферометрии повышенной чувствительности // 10-я всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-10: Тр. 10-й всероссийск. науч. конф., Москва, 1-7 апр. 2004 г. – М.: МГУ, 2004. – Ч.2. – С. 565-566.
131. Балан Н.Н., В.Г. Родин, В.Г., Стариков С.Н. Измерение микросмещений MEMS-структур методом голографической интерферометрии повышенной чувствительности // 4-я Азиатско-Тихоокеанская международная конференция «Фундаментальные проблемы опто- и микроэлектроники» (APCOM-2004): Тр. 4-й Азиатско-Тихоокеанская междунар. конф., Хабаровск, 12-16 сент. 2004 г. – Хабаровск: ИАПУ ДВО РАН, 2004. – С. 122-123.
132. Балан, Н.Н. Повышение точности голографических измерений параметров MEMS-NEMS-структур путем использования нелинейных эффектов // Микросистемная техника. –2004. – №7. – С. 15-19.

133. Балан Н.Н., Груздев А.О., В.Г. Родин, В.Г., Стариков С.Н. Измерение микросмещений MEMS-структур методом голографической интерферометрии // 1-й международный научно-практический форум «Голография. ЭКСПО – 2004»: Тезисы докладов 1-го международного науч.-практ. форума, Москва, 19-22 окт. 2004 г. – М.: ВВЦ, 2004. – С. 73-74.
134. Balan N.N., Rodin V.G., Starikov S.N. Measurement of MEMS structures microshifts by holographic interferometry with increased sensitivity // Proc.SPIE. –2005. – v.5851. – P. 319-326.
135. Власов Н. Г., Каленков Г.С., Штанько А.Е. Одномерный метод фазовых шагов. Научн. конф. МГТУ «Станкин», 2005. С.229-231.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова А.Т., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Вакуумная механика в электронном машиностроении: Монография. – М.: МИЭМ, 2009. – 145 с.
2. Информационные технологии в проектировании объектов электрон-ного машиностроения: Монография. В 5-ти кн. Кн. 1. В.А. Васин, А.С. Вишневский, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. Информационная технология в проектировании пластин плотной записи для накопителей на жёстких магнитных дисках. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2010. – 227 с.
3. Информационные технологии в проектировании объектов электронного машиностроения: Монография. В 5-ти кн. Кн. 2. В.А. Васин, К.И. Домась, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. Информационная технология в проектировании объектов лазерной обработки. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2011. – 211 с.
4. Информационные технологии в проектировании объектов электрон-ного машиностроения: Монография. В 5-ти кн. Кн. 3. В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, И.С. Кравчук, С.В. Степанчиков. Информационная технология в управлении качеством производства материалов на основе углеродных структур. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2011. – 209 с.
5. Информационные технологии в проектировании объектов электронного машиностроения: Монография. В 5-ти кн. Кн. 4. В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, А.Ю. Павлов, С.В. Степанчиков. Информационная технология в проектировании сканеров

- зондовых микроскопов. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2011. – 253 с.
6. Информационные технологии в проектировании объектов электрон-ного машиностроения: Монография. В 5-ти кн. Кн. 5. В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, М.М. Пак, С.В. Степанчиков. Информационная технология в проектировании нейронных сетей и процессов распознавания образов в кластерных системах обработки информации. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2011. – 237 с.
 7. Вернер В. Д., Мальцев П. П., Резнев А. А., Сауров А. Н., Чаплыгин Ю. А. Современные тенденции развития микросистемной техники // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 8. С. 2-6.
 8. Аравин В.В., Вернер В.Д., Мальцев П.П., Сауров А.Н. МЭМС высокого уровня - возможный путь развития МЭМС в России // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 28-31.
 9. Амеличев В.В., Годовицын И.В., Мальцев П.П., Сайкин Д.А., Федоров Р.А. Расчет параметров тестовой структуры МЭМС-акселерометра, изготовленного с использованием КНИ-пластин // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 12. С. 39-45.
 10. Бронникова Н.Г., Вopilкин Е.А., Савицкая Л.Н., Чеченин Ю.И., Шашкин В.И. Переменный МЭМС-конденсатор с электростатическим управлением // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12. С. 30-34.
 11. Парфенов Н.М., Соколов Л.В. Технологические особенности формирования трехмерных МЭМС // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 11. С. 19-26.
 12. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами.

- Часть I. Расчет емкостей // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 7. С. 37-41.
13. Драгунов В.П., Остертак Д.И. Электростатические взаимодействия в МЭМС с плоскопараллельными электродами. Часть II. Расчет электростатических сил // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 8. С. 40-47.
 14. Белозубов Е.М., Белозубова Н.Е. Тонкопленочные емкостные МЭМС-структуры с минимизацией влияния температур для датчиков давления // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 42-47.
 15. Белозубов Е.М., Белозубова Н.Е., Козлова Ю.А. Тонкопленочные емкостные МЭМС-структуры с возможностью измерения температур электродов // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9. С. 33-36.
 16. Амеличев В.В., Вернер В.Д., Ильков А.В. МЭМС-микрофон. Выбор материалов, конструкции и технологии. Часть 1. Электромеханический чувствительный элемент // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 53-62.
 17. Амеличев В.В., Вернер В.Д., Ильков А.В. МЭМС-микрофон. Выбор материала, конструкций и технологии*. II. Влияние полости под диафрагмой на характеристики микрофона // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 27-35.
 18. Александров С.Е., Волков В.В., Соловьев Ю.В., Спешилова А.Б. МЭМС-переключатель резистивно-емкостного типа // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 65-68.
 19. Zhu W. (Ed.) Vacuum Microelectronics, Wiley-Interscience. – 2001, ISBN: 047132244X, 396 pages.
 20. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Скворцов В.Э. Электроннолучевой микродисплей высокого разрешения на базе

- кремниевого автоэмиссионного нанокатода // Первый международный форум по нанотехнологиям. – М, 2008.
21. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. – М.: Физматлит, 2003. – 496 с.
 22. Srivastava V. THz Vacuum microelectronic devices // Proceedings of the International Symposium on “Vacuum Science and Technology” (IVS 2007), Journal of Physics: Conference Series 114 (2008).
 23. Zhiyu Wen, Ying Wu, Zhcngyuan Zhang, Shilu Xu, Shanglian Huang, Youli Li Development of an integrated vacuum microelectronic tactile sensor array // Sensors and Actuators A. - 2003, V. 103, p. 301–306.
 24. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966.
 25. Spindt C.A. et al. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // Journal of Applied Physics. vol. 47, No. 12; Dec. 1976; p. 5248–5263.
 26. Agache V., Ringot R., Bigotte P., Senez V., Legrand B., Buchailot L., Collard D. Modeling and experimental validation of sharpening mechanism based on thermal oxidation for fabrication of ultra-sharp silicon nanotips // IEEE Trans. on Nanotechnology. – 2005, v. 4. № 5, p. 548–554.
 27. 15. Djuzhev N.A., Beliaev S.N., Vlasenko V.A., Gogin A.A., Gontar V.M., Deniskin V.V., Mazaev A.A., Nevsky A.B., Tishin Y.I., Shokin A.N. A Silicon Gated Field Edge Cathode // The 16th International Vacuum Microelectronics Conference. 2003. Senri Life Science Center. Osaka. Japan.
 28. Дюжев Н.А., Махиборода М.А., Федирко В.Л. Исследование различных режимов автоэлектронной эмиссии кремниевого кантилевера // Вакуумная наука и техника. Материалы 14

научно-технической конференции (под ред. В. А. Быкова). – М.: МИЭМ, 2007, с. 248–251.

29. Досталко Л.П., Баранов В.В., Шаталов В.В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. – Минск, 1989. – 238 с.
30. Балан Н.Н., Лучников П.А., Ивашов Е.Н., Технологические принципы формирования пленочных элементов туннельного НЭМС преобразователя. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. / Под ред. чл.-корр. РАН А.С. Сигова – М.: МИРЭА-РАН, 2011, т.4, с. 260–267.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. МАРШРУТНАЯ КАРТА (СОПРОВОДИТЕЛЬНЫЙ ЛИСТ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ПЕРВОГО ЭТАПА РАЗРАБОТКИ

Основные характеристики технологического маршрута первого этапа разработки:

- Материал подложки – монокристаллический кремний с ориентацией (100).
- Размер кристалла – 4×4 мм.
- Конфигурация и размеры диафрагмы – правильный восьмиугольник шириной 2 мм. Гофрирование краев диафрагмы не предусматривалось.
- Материал диафрагмы – пленка поликристаллического кремния толщиной 0,6 мкм.
- Металлизация иглы и диафрагмы – Ti (30 нм) + Pt (50 нм). Рисунок металлизации формировался методом обратной (взрывной) литографии с маской из фоторезиста.
- Высота иглы – 1,5 мкм.
- Материал изоляции между металлизацией иглы и подложкой, а также между металлизацией диафрагмы и несущим слоем поликремния – пленка пиролитического нитрида кремния толщиной 125 нм.
- «Жертвенный» слой – слой фосфоросиликатного стекла толщиной 0,9 мкм и двуокиси кремния толщиной 0,25 мкм, осажденные из газовой фазы (метод LPCVD).
- Диаметр кремниевых пластин – 100 мм.

ППП А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX						
№	Операция	Лат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
1	Формирование					КЛБ 12 (100) ЕТО.035.669 ТУ			
2	ХО-1					ХО-1 №v- №			
3	Окисление 360А пол Si ₃ N ₄					Канал- № dx=			
4	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /			
5	«0» АНФ					№тр-			
6	Контроль «0» ФК ППП А-431-00 («Знаки»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
Реставрация №№ пл-н:									
6а	CD-контроль «0» ФК					№vст-			
		№	Lср		S	Lmin	Lmax		
7	РИТ Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					№vст- t= № dx= D			
8	Лазер.маркировка					№ №			
9	Сн. ф\д в КАРО					№ №			
10	ХО-1					ХО-1 №v- №			
11	Пирогенное окисление					0.285 мкм Канал- № dx=			
12	Травление SiO ₂					Б.Т.. t _{трав} = 60 с t=			
13	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ . t _{трав} = 90 мин			
	Контроль травл.					100 %			

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX						
№	Операция	Лат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
14	Травление SiO ₂					Б.Т.. t _{трав} = 5 мин t=			
15	ХО-1					ХО-1 №v- №			
16	Окисление 360А пол Si ₃ N ₄					Канал- № dx=			
17	Ионное легиров. БОР					D = 500 мкКvл/см ² E = 40 КэВ №vст-			
18	ХО-1					ХО- №v- №			
19	Разгонка бора 1150°C					0.11 мкм Канал- № dx=			
20	Стравливание SiO ₂					Б.Т.. t _{трав} = до скатыв. + 30с (>2 мин) t=			
21	ХО-1					ХО- №v- №			
22	Окисление 360А пол Si ₃ N ₄					Канал- № dx=			
23	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /			
24	Окисление Si ₃ N ₄					950°C Канал-			
25	1 АНФ					№тп-			
26	Контроль 1 ФК ППШ А-494-01 («Игла»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
Реставрация №№ пл-н:									
26а	CD-контроль 1 ФК					№vст-			
		№	Lср		S	Lmin	Lmax		

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS				XXXX			
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
27	РИТ Si ₃ N ₄ + SiO ₂ 0.13 + 0.04 мкм					№вст- t= № dx= D с технологом лаб.7111	
28	ПХТ Si изотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№вст- t= № dx= D с технологом лаб.7111	
29	РИТ Si анизотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№вст- t= № dx= D с технологом лаб.7111	
30	Сн. ф\о в КАРО					№ №	
31	ХО-1					ХО- №v- №	
32	Пирогенное окисление					0.65 мкм Канал- № dx=	
33	Травление SiO ₂					Б.Т.. t _{трав} = 1мин t=	
34	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ . t _{трав} = 90 мин	
35	Травление SiO ₂					Б.Т.. t _{трав} = >12 мин до скаtyw. + 1 мин	
36	ХО-1					ХО- №v- №	
37	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
38	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
39	Магнетронное напыление Pt 1 500 Å					T _{полл} = 300°C	ЗАО «МТ»
40	2 АНФ					№тр-	
41	Контроль 2 ФК ППШ А-494-04 «Металлизация иглы»					Дефектность №	
42	РИТ Pt 1 500 Å					с технологом лаб. 7111	
43	ПХ снятие ф\о					t = 2 мин	

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX				
№	Операция	Лат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
44	Сн. ф\д в КАРО					№ №	
45	ХО-2					ХО- №v- №	
46	Осаждение БФСС 1.0 мкм					Канал- dx= № / № /	
47	Оплавление БФСС 850°C					T=850°C: H ₂ /O ₂ : t=30 мин	
48	ХО-2					ХО- №v- №	
49	3 АНФ					№тд-	
50	Контроль 3 ФК ППШ А-494-03 «Границы БФСС»					Дефектность №	
51	Травление БФСС					Б.Т.: t _{трав} = 20 мин.	
52	Сн. ф\д в КАРО					№ №	
53	ХО-2					ХО- №v- №	
54	Осаждение SiO ₂ 0.19 мкм					Канал- TEOS dx-	
55	SP - контроль					dx-	
56	4 АНФ					№тд-	
57	Контроль 4 ФК ППШ А-494-06 «Границы SiO ₂ »					Дефектность №	
58	Травление SiO ₂					Б.Т.: t _{трав} = 2 мин.	
59	Сн. ф\д в КАРО					№ №	
60	ХО-2					ХО- №v- №	
61	Магнетронное напыление Pt 2 500 Å					T _{полл} = 300°C	ЗАО «МТ»
62	5 АНФ					№тд-	

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX				
№	Операция	Лат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
63	Контроль 5 ФК ППШ А-494-04 «Металлизация мембраны»					Дефектность №	
64	РИТ Pt 2 500 Å					с технологом лаб. 7111	
65	ПХ снятие ф\л					t = 2 мин	
66	Сн. ф\л в КАРО					№ №	
67	ХО-2					ХО- №v- №	
68	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
69	Осаждение polv-Si 0.6 – 2.4 мкм				3 3 3 3 12	Раздельно по лотам: 1 слой – 0.6 мкм 2 слоя – 1.2 мкм 3 слоя - 1.8 мкм 4 слоя - 2.4 мкм резерв	
70	6 АНФ					№тв-	
71	Контроль 6 ФК ППШ А-494-05 «Мембрана»					Дефектность №	
72	РИТ polv-Si + Si ₃ N ₄					Раздельно по лотам с учетом толщины polv-Si с технологом лаб.7111	
73	ПХ снятие ф\л					№vст t= №	
74	Сн. ф\л в КАРО					№ №	
75	Лисковая резка пластин на кристаллы					Алмазный диск: с защитной пленкой	Сбороч. произ- водство

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX				
№	Операция	Лат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
76	Раскладка кристаллов в ячейки кассеты						Сбороч. производство
77	Хим. вытравливание SiO ₂ и БФСС из-под мембраны					Б.Т.: в кассете: $t_{\text{трав}} = 170$ мин. с ведущим технологом	Лаб. 7113
78	Промывка в проточной деионизованной воде					Деиониз. вода: в кассете: $t_{\text{пром}} = 3$ часа	Лаб. 7113
79	Промывка в 3-х ваннах с ацетоном					Ацетон осч: в кассете	Лаб. 7113
80	Сушка чипов в кассете (воздушная)					Ламинатный бокс: $t_{\text{сушки}} = 24$ часа	Лаб. 7113
81	ПХ обработка чипов в кассете					Кварцевая кассета: в режиме снятия ф/р	Лаб. 7111

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. МАРШРУТНАЯ КАРТА (СОПРОВОДИТЕЛЬНЫЙ ЛИСТ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ВТОРОГО ЭТАПА РАЗРАБОТКИ

Основные характеристики технологического маршрута второго этапа разработки:

- Материал подложки – монокристаллический кремний с ориентацией (100).
- Размер кристалла – 4×4 мм.
- Конфигурация и размеры заложенных в топологию структур – 15 различных вариантов чувствительных элементов с размерами диафрагмы от 0,2 мм до 2,0 мм и с различным количеством гофров, а также структура, содержащая свободные консоли и двухсторонне закрепленные балки.
- Материал диафрагмы – пленка поликристаллического кремния толщиной 1,2 мкм и 2,4 мкм (в двух вариантах исполнения).
- Металлизация иглы и диафрагмы – металлическая платина
- Высота иглы – 1,5 мкм.
- Материал изоляции между металлизацией иглы и подложкой, а также между металлизацией диафрагмы и несущим слоем поликремния – пленка пиролитического нитрида кремния толщиной 125 нм.
- «Жертвенный» слой – слой фосфоросиликатного стекла толщиной 0,9 мкм и двуокиси кремния толщиной 0,25 мкм, осажденные из газовой фазы (метод LPCVD).
- Диаметр кремниевых пластин – 150 мм.

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001						
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
1	Формирование					КДБ 12 (100) ЕТО.035.669 ТУ			
2	ХО-1					ХО-1 №у- №			
3	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=			
4	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /			
5	«0» АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр-			
6	Контроль «0» ФК ПШ А– 431-00 !!! («Знаки»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
Реставрация №№ пл-н:									
6а	CD-контроль «0» ФК					№уст-			
		№	Lcp		S	Lmin	Lmax		
7	РИТ Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					№уст- t= № dx= D			
8	Лазер.маркиров.					№ №			
9	Сн. ф\р в КАРО					№ №			
10	ХО-1					ХО-1 №у- №			
11	Пирогенное окисление					0,285 мкм Канал- № dx=			
12	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 60 с t=			

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
13	Травление Si_3N_4					H_3PO_4 , $t_{\text{трав}} = 90$ мин	
	Контроль травл.					100 %	
14	Травление SiO_2					Б.Т., $t_{\text{трав}} = 5$ мин $t=$	
15	ХО-1					ХО-1 №у- №	
16	Окисление 360А под Si_3N_4					Канал- № $dx=$	
17	Ионное легиров. БОР					$D = 500$ мкКл/см ² $E = 40$ КэВ №уст-	
18	ХО-1					ХО- №у- №	
19	Разгонка бора 1150°C					0,11 мкм Канал- № $dx=$	
20	Стравливание SiO_2					Б.Т., $t_{\text{трав}} =$ до скатаыв. + 30с (>2 мин) $t=$	
21	ХО-1					ХО- №у- №	
22	Окисление 360А под Si_3N_4					Канал- № $dx=$	
23	Осаждение Si_3N_4 0.13 мкм					Канал- $dx=$ № / № /	
24	Окисление Si_3N_4					950°C Канал-	
25	1 АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр-	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001						
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
26	Контроль 1 ФК ПШ А– 494-01 («Игла»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
	Реставрация №№ пл-н:								
26a	CD-контроль 1 ФК					№уст-			
		№	Lcp		S	Lmin	Lmax		
27	РИТ Si ₃ N ₄ + SiO ₂ 0.13 + 0.04 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111			
28	ПХТ Si изотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111			
29	РИТ Si анизотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111			
30	Сн. ф\р в КАРО					№	№		
31	ХО-1					ХО-	№у-	№	
32	Пирогенное окисление					0,65 мкм Канал- № dx=			
33	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 1 мин t=			
34	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ , t _{трав} = 90 мин			

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
35	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = >12 мин до скатыв. + 1 мин	
36	ХО-1					ХО- №у- №	
37	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
38	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
39	ХО-1					ХО- №уст №	
40	Повторное осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
41	ХО-1					ХО- №уст №	
42	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25 мкм					Канал- dx= № №	
43	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
44	2 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
45	Контроль 2 ФК ПШ А– 494-02.02 «Метал. иглы»					Дефектность № С ведущим технологом	
46	РИТ Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					№уст- t= № dx= D	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
47	Хим. травл. ЛТО SiO ₂ 0,25 мкм					Б.Т., t _{тр} = 3 мин.	
48	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
49	ХО-1					ХО- №у- №	
50	Магнетронное напыление Pt1 500 Å					T _{подл.} < 100°C	ЗАО «МТ»
51	«Взрыв» ЛТО SiO ₂ с Pt1					Б.Т., t _{тр} = 10 мин.(?) с ведущ. техн.	
52	Гидромех. отмывка					С ведущим технологом.	
53	ХО-1					ХО- №у- №	
54	Осаждение БФСС 0,55 мкм					Канал- dx= № / № /	
55	Оплавление БФСС 850°C					T=850°C; H ₂ /O ₂ ; t=30 мин	
56	Осаждение БФСС 0,55 мкм					Канал- dx= № / № /	
57	Оплавление БФСС 850°C					T=850°C; H ₂ /O ₂ ; t=30 мин	
58	Осаждение БФСС 0,55 мкм					Канал- dx= № / № /	
59	Оплавление БФСС 850°C					T=850°C; H ₂ /O ₂ ; t=30 мин	
60	3 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
61	Контроль 3 ФК ПШ А– 494-03 «Границы БФСС»					Дефектность №	
62	Хим. травление БФСС					Б.Т.; $t_{\text{трав}} = 30$ мин.	
63	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
64	ХО-2					ХО- №у- №	
65	АНФ ф/р 1,3 мкм						
67	ПХ планаризация БФСС					$dx = 0,6$ мкм с ведущим технологом	
68	ПХ снятие ф/р						
69	4 АНФ ф/р 1,8 мкм						
70	Контроль 4 ФК ПШ А- 494-06.01 «Окно иглы»					Дефектность №	
71	Частичное хим. травление БФСС					Б.Т.; $t=10$ мин (0,6 мкм) с ведущим технологом	
72	Осаждение LTO SiO ₂ 0.5 мкм					Канал- dx-	
73	SP – контроль					dx-	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
74	5 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
75	Контроль 5 ФК ПШ А– 494-06-02 «Границы SiO ₂ »					Дефектность №	
76	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 5 мин. с ведущим технологом	
77	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
78	ХО-2					ХО- №у- №	
79	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
80	6 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
81	Контроль 6 ФК ПШ А– 494-06-01 «Окно иглы»					Дефектность №	
82	РИТ Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					№уст- t= № dx= D	
83	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
84	ХО-2					ХО- №у- №	
85	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25 мкм					Канал- dx= № №	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
86	Осаждение Si_3N_4 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
87	7 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
88	Контроль 7 ФК ПШ А– 494-04.02 «Металлизация мембраны»					Дефектность №	
89	РИТ Si_3N_4 0.13 мкм					№уст- t= № dx= D	
90	Хим. травл. ЛТО SiO_2 0,25 мкм					Б.Т., $t_{\text{тр}} = 3$ мин.	
91	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
92	ХО-2					ХО- №у- №	
93	Магнетронное напыление Pt 2 500 Å					$T_{\text{подл.}} < 100^\circ\text{C}$	ЗАО «МТ»
94	«Взрыв» ЛТО SiO_2 с Pt1					Б.Т., $t_{\text{тр}} = 10$ мин.(?) с ведущ. техн.	
95	Гидромех. отмывка					с ведущим технологом	
96	ХО-2					ХО- №у- №	
97	Осаждение Si_3N_4 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
98	Осаждение LTO SiO_2 0.5 мкм					Канал- dx= № / № /	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
99	8 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
100	Контроль 8 ФК ПШ А– 494-06-03 «Защита КПл»					Дефектность №	
101	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 6 мин.	
102	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
103	ХО-2					ХО- №у- №	
104	Осаждение poly-Si 1,2 – 2,4 мкм				3 3 3 3	Раздельно по лотам: 2 слоя – 1,2 мкм 3 слоя - 1,8 мкм 4 слоя - 2,4 мкм резерв	
105	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25 мкм					Канал- dx= № / № /	
106	Отжиг					850° C; H ₂ /O ₂ ; t=30 мин	
107	9 АНФ					№тр-	
108	Контроль 9 ФК ПШ А– 494-05 «Мембрана»					Дефектность № С ведущим технологом	
109	РИТ ЛТО SiO ₂ 0.25 мкм						

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
110	РИТ poly-Si + Si ₃ N ₄					Раздельно по лотам с учетом толщины poly-Si с технологом лаб.7111	
111	ПХ снятие ф\р					№ _{уст} t= №	
112	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
113	10 АНФ					№тр-	
114	Контроль 10 ФК ПШ А– 494-06.04 «Вскрытие КП»					Дефектность № С ведущим технологом	
115	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 6 мин.	
116	РИТ Si ₃ N ₄ 0,26 мкм						
117	ПХ снятие ф/р						
118	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
119	Дисковая резка пластин на крист					Алмазный диск; с защитной пленкой	Сбороч. произ- водство
120	Раскладка кристаллов в ячейки кассеты						Сбороч. произ- водство
121	Хим. вытравли- вание SiO ₂ и БФСС из-под мембраны					Б.Т.; в кассете; t _{трав} = 170 мин. с ведущим технологом	Лаб. 7113

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
122	Промывка в проточной деионизованной воде					Деиониз. вода; в кассете; $t_{\text{пром}} = 3$ часа	Лаб. 7113
123	Промывка в 3-х ваннах с ацетоном					Ацетон осч ; в кассете	Лаб. 7113
124	Сушка чипов в кассете (воздушная)					Ламинарный бокс; $t_{\text{сушки}} = 24$ часа	Лаб. 7113
125	ПХ обработка чипов в кассете					Кварцевая кассета; в режиме снятия ф/р	Лаб. 7111

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. МАРШРУТНАЯ КАРТА (СОПРОВОДИТЕЛЬНЫЙ ЛИСТ) МОДИФИЦИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ВТОРОГО ЭТАПА РАЗРАБОТКИ

Основные характеристики модифицированного технологического маршрута второго этапа разработки:

- Материал подложки – монокристаллический кремний с ориентацией (100).
- Размер кристалла – 4×4 мм.
- Конфигурация и размеры заложенных в топологию структур – 15 различных вариантов чувствительных элементов с размерами диафрагмы от 0,2 мм до 2,0 мм и с различным количеством гофров, а также структура, содержащая свободные консоли и двухсторонне закрепленные балки.
- Материал диафрагмы – пленка поликристаллического кремния толщиной 1,2 мкм и 2,4 мкм (в двух вариантах исполнения).
- Металлизация иглы и диафрагмы – силицид платины.
- Высота иглы – 1,5 мкм.
- Материал изоляции между металлизацией иглы и подложкой, а также между металлизацией диафрагмы и несущим слоем поликремния – пленка пиролитического нитрида кремния толщиной 125 нм.
- «Жертвенный» слой – слой ФСС толщиной 0,9 мкм и SiO₂ толщиной 0,25 мкм, осажденные методом LPCVD.
- Диаметр кремниевых пластин – 150 мм.

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS				XXXX LL-22-A001					
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
1	Формирование					КДБ 12 (100) ЕТО.035.669 ТУ			
2	ХО-1					ХО-1 №у- №			
3	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=			
4	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /			
5	«0» АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр-			
6	Контроль «0» ФК ППШ А-431-00 !!! («Знаки»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
Реставрация №№ пл-н:									
6а	CD-контроль «0» ФК					№уст-			
		№	Lcp		S	Lmin	Lmax		
7	РИТ Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					№уст- t= № dx= D			
8	Лазер.маркиров.					№ №			
9	Сн. ф\р в КАРО					№ №			
10	ХО-1					ХО-1 №у- №			
11	Пирогенное окисление					0,285 мкм Канал- № dx=			

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
12	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 60 с t=	
13	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ , t _{трав} = 90 мин	
	Контроль травл.					100 %	
14	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 5 мин t=	
15	ХО-1					ХО-1 №у- №	
16	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
17	Ионное легиров. БОР					D = 500 мкКл/см ² E = 40 КэВ №уст-	
18	ХО-1					ХО- №у- №	
19	Разгонка бора 1150°C					0,11 мкм Канал- № dx=	
20	Стравливание SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = до скатаив. + 30с (>2 мин) t=	
21	ХО-1					ХО- №у- №	
22	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
23	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
24	Окисление Si ₃ N ₄					950°C Канал-	

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001						
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
25	1 АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр-			
26	Контроль 1 ФК ППШ А–494-01 («Игла»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
	Реставрация №№ пл-н:								
26a	CD-контроль					№уст-			
27	РИТ Si ₃ N ₄ + SiO ₂ 0.13 + 0.04 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111			
28	ПХТ Si изотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111			
29	РИТ Si анизотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111			
30	Сн. ф\р в КАРО					№ №			
31	ХО-1					ХО- №у- №			
32	Пирогенное окисление					0,65 мкм Канал- № dx=			
33	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 1 мин t=			
34	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ , t _{трав} = 90 мин			
35	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = >12 мин до скатыв. + 1 мин			

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
36	ХО-1					ХО- №у- №	
37	Окисление 360Å под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
38	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
39	ХО-1					ХО- №уст №	
40	Осаждение poly-Si 800 Å					Канал- dx= № №	
41	2 АПФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
42	Контроль 2 ФК ПШ А-494-02 «Метал. иглы»					Дефектность № С ведущим технологом	
43	Задубливание ф/р на уст-ке SOG					T = 170° C	
44	3 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
45	Контроль 3 ФК ПШ А-494-02 Повторная ф/л «Метал. иглы»					Дефектность № С ведущим технологом	
46	РИТ poly-Si 800 Å					№уст t= № dx= D	
47	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
48	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
49	ХО-1					ХО- №у- №	
50	Магнетронное напыление Pt1 500 Å					$T_{\text{подл}} = 300^{\circ}\text{C}$	ЗАО «МТ»
51	Вжигание Pt 550°C					$T = 550^{\circ}\text{C}$, Канал- N_2 , $t = 60$ мин	
52	Хим. травление Pt					$\text{HNO}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O} =$ $1 : 5 : 5$; $T = 50^{\circ}\text{C}$; $t = 30$ м	Ведущ. технол.
53	Освежение в хим. травителе для poly-Si					$t = 10$ сек. С ведущим технологом	
54	ХО-1					ХО- №у- №	
55	Осаждение ФСС 0,6 мкм					Канал- $dx =$ № / № /	
56	Осаждение ФСС 0,6 мкм					Канал- $dx =$ № / № /	
57	Осаждение LTO SiO_2 0.25 мкм					Канал- dx-	
58	АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр	
59	ПХ планаризация SiO_2 и ФСС					$dx = 0,8$ мкм !!! с ведущим технологом	
60	ПХ снятие ф/р					$t = 2$ мин	
61	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
62	ХО-2					ХО- №у- №	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
63	4 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр	
64	Контроль 4 ФК ПШ А-494-06.01 «Окно иглы»					Дефектность №	
65	ПХТ ФСС					dx = 0,6 мкм !!! с ведущим технологом	
66	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
67	ХО-2					ХО- №у- №	
68	5 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
69	Контроль 5 ФК ПШ А-494-03 «Границы ФСС»					Дефектность №	
70	ПХТ SiO ₂ и ФСС					dx = 2,0 мкм	
71	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
72	ХО-2					ХО- №у- №	
73	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25x2 мкм					Канал- dx-	
74	6 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
75	Контроль 6 ФК ПШ А-494-06-02 «Границы SiO ₂ »					Дефектность №	
76	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 5 мин. с ведущим технологом	
77	Сн. ф\р в КАРО					№ №	

ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
78	ХО-2					ХО- №у- №	
79	Осаждение poly-Si 800 Å					Канал- № dx= №	
80	7 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
81	Контроль 7 ФК ППШ А-494-04 «Металлизация мембраны»					Дефектность №	
82	РИТ poly-Si 800 Å					№уст № dx= t= D	
83	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
84	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
85	ХО-2					ХО- №у- №	
86	Магнетронное напыление Pt 2 500 Å					T _{подл.} = 300°C	
87	Вжигание Pt 550°C					T= 550° C, Канал- N ₂ , t = 60 мин	
88	Хим. травление Pt					HNO ₃ : HCl : H ₂ O = 1 : 5 : 5; T= 50° C; t=30 м	Ведущ. технол.
89	ХО-2					ХО- №у- №	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
90	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
91	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25 мкм					Канал- dx= № / № /	
92	8 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
93	Контроль 8 ФК ПШ А-494-06-03 «Защита КПл»					Дефектность №	
94	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 4 мин.	
95	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
96	ХО-2					ХО- №у- №	
97	Осаждение poly-Si 1,2 – 2,4 мкм				2 2 2 2	Раздельно по лотам: 2 слоя – 1,2 мкм 3 слоя - 1,8 мкм 4 слоя - 2,4 мкм резерв	
98	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25 мкм					Канал- dx= № / № /	
99	9 АНФ					№тр-	
100	Контроль 9 ФК ПШ А-494-05 «Мембрана»					Дефектность № С ведущим технологом	
101	РИТ ЛТО SiO ₂ 0.25 мкм						
102	РИТ poly-Si + Si ₃ N ₄					Раздельно по лотам с учетом толщины poly-Si с технологом лаб.7111	

ПШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
103	ПХ снятие ф\р					№уст t= №	
104	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
105	10 АНФ					№тр-	
106	Контроль 10 ФК ПШ А–494-06.04 «Вскрытие КП»					Дефектность № С ведущим технологом	
107	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 4 мин.	
108	ПХ снятие ф/р						
109	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
110	Дисковая резка пластин на крист					Алмазный диск; с защитной пленкой	Сбороч. произ- водство
111	Раскладка кристаллов в ячейки кассеты						Сбороч. произ- водство
112	Хим. вытравли- вание SiO ₂ и БФСС из-под мембраны					Б.Т.; в кассете; t _{трав} = 170 мин. с ведущим технологом	Лаб. 7113
113	Промывка в проточной деионизованной воде					Деиониз. вода; в кассете; t _{пром} = 3 часа	Лаб. 7113
114	Промывка в 3-х ваннах с ацетоном					Ацетон осч ; в кассете	Лаб. 7113

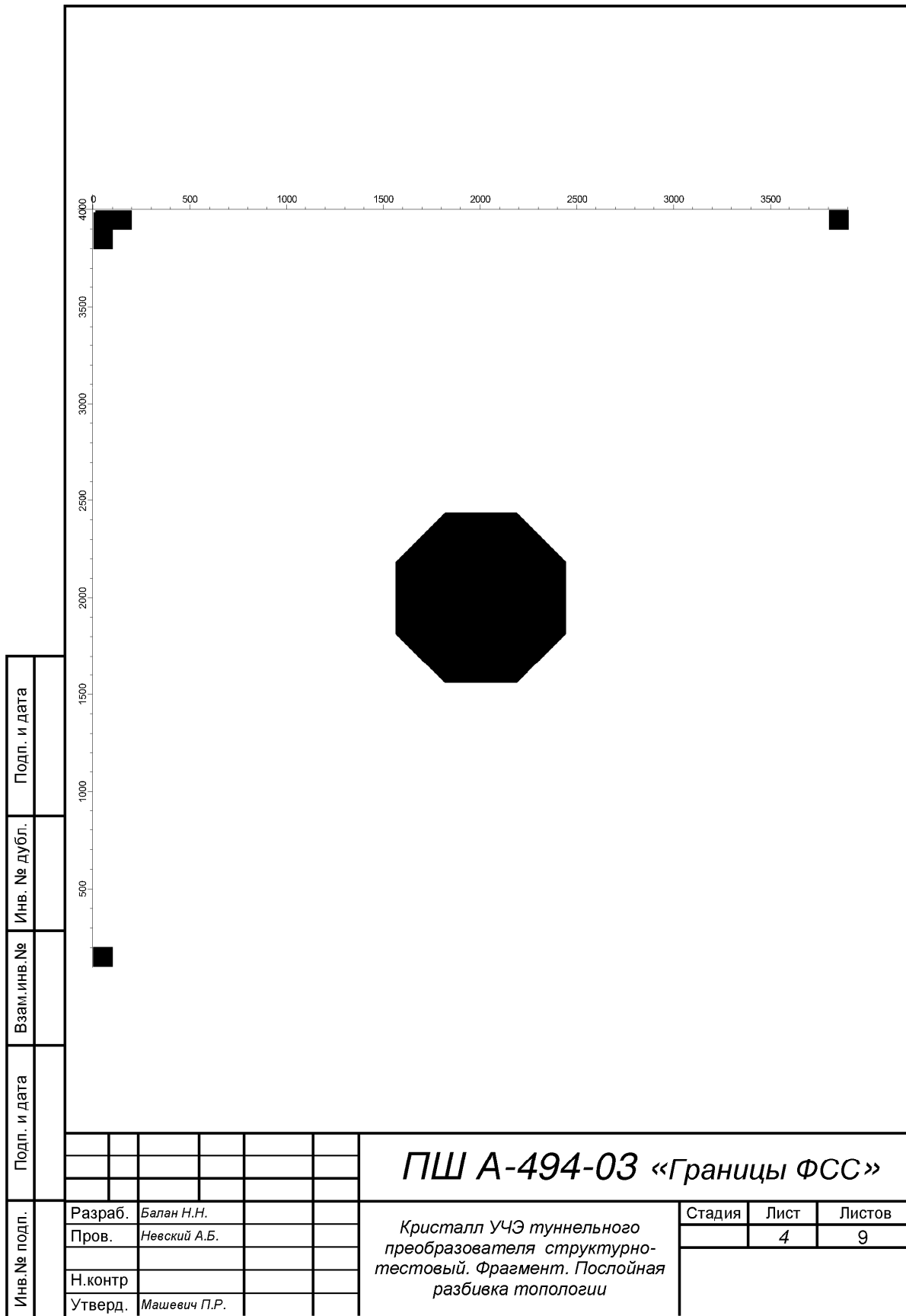
ППШ А – 494 Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
115	Сушка чипов в кассете (воздушная)					Ламинарный бокс; $t_{\text{сушки}} = 24$ часа	Лаб. 7113
116	ПХ обработка чипов в кассете					Кварцевая кассета; в режиме снятия ф/р	Лаб. 7111

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. ПОСЛОЙНАЯ РАЗБИВКА ТОПОЛОГИИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ В РАМКАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВТОРОГО ЭТАПА РАЗРАБОТКИ (ФРАГМЕНТ)

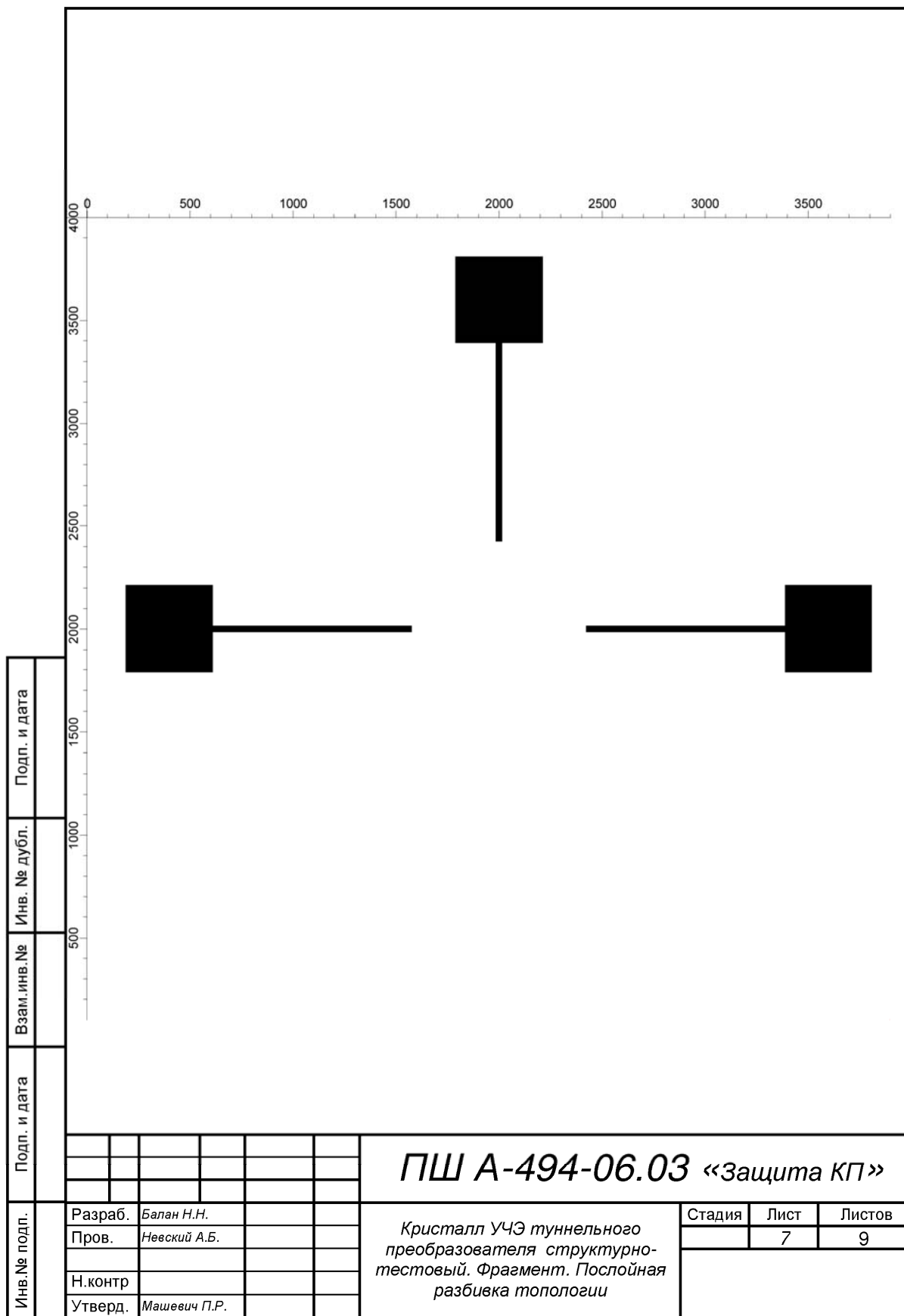
Для формирования фотолитографического рисунка тестовой структуры на пластинах монокристаллического кремния диаметром 150 мм была использована установка проекционной мультипликации модели ЭМ 5084АМ с максимальным размером кадра изображения 16×16 мм, что при размерах одного УЧЭ 4×4 мм давало возможность в составе одного кадра изображения разместить 16 различных вариантов тестовых элементов. В настоящем приложении изображен один из вариантов.

Общее количество сгенерированных фотошаблонов – 10 шт.
Генерация изображения проводилась на электронно-лучевой установке ZBA-20.

Инв.№ подл.	Разраб.	Балан Н.Н.			ПШ А-494-02 «Метал. иглы» Кристалл УЧЭ туннельного преобразователя структурно-тестовый. Фрагмент. Послойная разбивка топологии	Стадия	Лист	Листов
	Пров.	Невский А.Б.					2	9
	Н.контр							
	Утверд.	Машевич П.Р.						
Подп. и дата	Взам.инв.№	Инв. № дубл.	Подп. и дата					



Инв.№ подл.	Разраб.	Балан Н.Н.					ПШ А-494-04 «Метал. мембраны» Кристалл УЧЭ туннельного преобразователя структурно-тестовый. Фрагмент. Послойная разбивка топологии	Стадия	Лист	Листов
	Пров.	Невский А.Б.							6	9
	Н.контр									
	Утверд.	Машевич П.Р.								
Инв.№ инв.№	Взам.инв.№	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Подп. и дата						



Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата										
	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата										
	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата										
	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата										
	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата										
Инв. № подл.	Разраб.	Балан Н.Н.					ПШ А-494-05 «Мембрана» Кристалл УЧЭ туннельного преобразователя структурно-тестовый. Фрагмент. Послойная разбивка топологии				Стадия	Лист	Листов	
	Пров.	Невский А.Б.											8	9
	Н.контр													
	Утверд.	Машевич П.Р.												

Инв.№ подл.	Разраб.	Балан Н.Н.			ПШ А-494-06.04 «Вскрытие КП» Кристалл УЧЭ туннельного преобразователя структурно-тестовый. Фрагмент. Послойная разбивка топологии	Стадия	Лист	Листов
	Пров.	Невский А.Б.					9	9
	Н.контр							
	Утверд.	Машевич П.Р.						
	Подп. и дата	Взам.инв.№	Инв. № дубл.	Подп. и дата				

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. МАРШРУТНАЯ КАРТА (СОПРОВОДИТЕЛЬНЫЙ ЛИСТ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ТРЕТЬЕГО ЭТАПА РАЗРАБОТКИ (ПРОЕКТ)

При формировании настоящей маршрутной карты были учтены, в частности, следующие рекомендации:

- ввести дополнительный изолирующий слой, исключающий электрическое сваривание слоев металлизации верхнего и нижнего уровней при их контакте в случае электростатического схлопывания;
- провести эксперименты по вытравливанию «жертвенного» слоя в перекисно-аммиачных растворах, обладающих большей селективностью травления ФСС (использование перекисно-аммиачных растворов исключило бы подтравливание адгезионного подслоя и, следовательно, дало бы возможность для формирования рисунка нижней металлизации использовать пленку металлической платины);
- для выравнивания поверхности жертвенного слоя использовать операцию химико-механической планаризации;
- во избежание дополнительного изгиба свободных поликремниевых диафрагменных и балочных структур исключить нанесение слоя верхней металлизации (и, следовательно, изолирующего напряженного слоя нитрида) по всей площади структуры, ограничившись лишь небольшой областью непосредственно над иглой.

ППШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001						
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №
1	Формирование					КДБ 12 (100) ЕТО.035.669 ТУ			
2	ХО-1					ХО-1 №у- №			
3	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=			
4	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /			
5	«0» АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр-			
6	Контроль «0» ФК ППШ А–431-00 !!! («Знаки»)					№	L	D	
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ							
Реставрация №№ пл-н:									
6а	CD-контроль «0» ФК					№уст-			
		№	Lcp		S	Lmin	Lmax		
7	РИТ Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					№уст- t= № dx= D			
8	Лазер.маркиров.					№ №			
9	Сн. ф\р в КАРО		ПАРТИЯ			№ №			
10	ХО-1					ХО-1 №у- №			

ППШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
11	Пирогенное окисление					0,285 мкм Канал- № dx=	
12	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 60 с t=	
13	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ , t _{трав} = 90 мин	
	Контроль травл.					100 %	
14	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 5 мин t=	
15	ХО-1					ХО-1 №у- №	
16	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
17	Ионное легиров. БОР					D = 500 мкКл/см ² E = 40 КэВ №уст-	
18	ХО-1					ХО- №у- №	
19	Разгонка бора 1150°C					0,11 мкм Канал- № dx=	
20	Стравливание SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = до скатаыв. + 30с (>2 мин) t=	
21	ХО-1					ХО- №у- №	
22	Окисление 360А под Si ₃ N ₄					Канал- № dx=	
23	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
24	Окисление Si ₃ N ₄					950°C Канал-	

ПШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001								
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы			Таб. №		
25	1 АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр-					
26	Контроль 1 ФК ПШ А–XXX-01 («Игла»)					№	L	D			
	№ УСЭ -	Контр. пласт. УСЭ									
Реставрация №№ пл-н:											
26a	CD-контроль 1 ФК					№уст-					
						№	Lcp	S		Lmin	Lmax
27	РИТ Si ₃ N ₄ + SiO ₂ 0.13 + 0.04 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111					
28	ПХТ Si изотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111					
29	РИТ Si анизотропное 0.7 +/- 0.1 мкм					№уст- t= № dx= D с технологом лаб.7111					
30	Сн. ф\р в КАРО					№ №					
31	ХО-1					ХО- №у- №					
32	Пирогенное окисление					0,65 мкм Канал- № dx=					

ПШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
33	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = 1 мин t=	
34	Травление Si ₃ N ₄					H ₃ PO ₄ , t _{трав} = 90 мин	
35	Травление SiO ₂					Б.Т., t _{трав} = >12 мин до скатыв. + 1 мин	
36	ХО-1					ХО- №у- №	
37	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- № dx=	
38	АНФ ф/р 1,3 мкм						
39	ПХ зачистка ф/р и Si ₃ N ₄ 0.13 мкм над иглой					№уст t= № dx= D С технологом лаб 7111	
40	ПХ снятие ф/р					t = мин	
41	Осаждение Si ₃ N ₄ 0.13 мкм					Канал- dx= № / № /	
42	ХО-1					ХО- №уст №	
43	Осаждение poly-Si 800 Å					Канал- dx= № №	
44	2 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
45	Контроль 2 ФК ПШ А-XXX-02 «Метал. иглы»					Дефектность № С ведущим технологом	
46	Задубливание ф/р на уст-ке SOG					T = 170° C	
47	2а АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	

ПШ А – ХХХ Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
48	Контроль 2а ФК ПШ А–ХХХ-02 Повторная ф/л «Метал. иглы»					Дефектность № С ведущим технологом	
49	РИТ poly-Si 800 Å					№уст t= № dx= D	
50	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
51	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
52	ХО-1					ХО- №у- №	
53	Магнетронное напыление Pt1 500 Å					T _{подл.} = 300°C	ЗАО «МТ»
54	Вжигание Pt 550°C					T= 550° C, Канал- N ₂ , t = 60 мин	
55	Хим. травление Pt					HNO ₃ : HCl : H ₂ O = 1 : 5 : 5; T= 50° C; t=30 м	Ведущ. технол.
56	Освежение в хим. травителе для poly-Si					t = 10 сек. С ведущим технологом	
57	ХО-1					ХО- №у- №	
58	Осаждение ФСС 0,6 мкм					Канал- dx= № / № /	
59	Осаждение ФСС 0,6 мкм					Канал- dx= № / № /	
60	Осаждение LTO SiO ₂ 0.25 мкм					Канал- dx-	

ПШ А – ХХХ Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
61	АНФ ф/р 1,3 мкм					№тр	
62	ПХ планаризация SiO ₂ и ФСС					dx = 0,8 мкм !!! с ведущим технологом	
63	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
64	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
65	ХО-2					ХО- №у- №	
66	3 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр	
67	Контроль 3 ФК ПШ А-ХХХ 03 «Окно иглы»					Дефектность №	
68	ПХТ ФСС					dx = 0,6 мкм !!! с ведущим технологом	
69	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
70	ХО-2					ХО- №у- №	
71	4 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
72	Контроль 4 ФК ПШ А-ХХХ-04 «Границы ФСС»					Дефектность №	
73	ПХТ SiO ₂ и ФСС					dx = 2,0 мкм	
74	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
75	ХО-2					ХО- №у- №	

ПШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
76	Осаждение LTO SiO₂ 0.25 мкм					Канал- dx-	
77	5 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
78	Контроль 5 ФК ПШ А–XXX-05 «Границы SiO ₂ »					Дефектность №	
79	Хим. травление SiO ₂					Б.Т.; t _{трав} = 5 мин. с ведущим технологом	
80	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
81	ХО-2					ХО- №у- №	
82	Осаждение poly-Si 800 Å					Канал- dx= № №	
83	6 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
84	Контроль 6 ФК ПШ А–XXX-06 «Металлизация мембраны»					Дефектность №	
85	РИТ poly-Si 800 Å					№уст t= № dx= D	
86	ПХ снятие ф/р					t = 2 мин	
87	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
88	ХО-2					ХО- №у- №	

ПШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
89	Магнетронное напыление Pt 2 500 Å					$T_{\text{подл.}} = 300^{\circ}\text{C}$	
90	Вжигание Pt 550°C					$T = 550^{\circ}\text{C}$, Канал- N_2 , $t = 60$ мин	
91	Хим. травление Pt					$\text{HNO}_3 : \text{HCl} : \text{H}_2\text{O} =$ $1 : 5 : 5$; $T = 50^{\circ}\text{C}$; $t = 30$ м	Ведущ. технол.
92	ХО-2					ХО- №у- №	
93	Осаждение Si_3N_4 0.13 мкм					Канал- $dx =$ № / № /	
94	7 АНФ ф/р 1,8 мкм					№тр-	
95	Контроль 7 ФК ПШ А–XXX-07 «Защита ММ»					Дефектность №	
96	РИТ Si_3N_4 0.13 мкм					№уст- $t =$ № $dx =$ D	
97	ПХ снятие ф/р					$t = 2$ мин	
98	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
99	ХО-2					ХО- №у- №	
100	Осаждение poly-Si 800 Å					Канал- $dx =$ № №	

ППП А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
101	Ионное легиров. ФОСФОР					$D = 500 \text{ мкКл/см}^2$ $E = 80 \text{ КэВ}$ №уст-	
102	ХО-2					ХО- №у- №	
103	Осаждение poly-Si 0,6 мкм					Канал- dx= № №	
104	Ионное легиров. ФОСФОР					$D = 500 \text{ мкКл/см}^2$ $E = 80 \text{ КэВ}$ №уст-	
105	ХО-2					ХО- №у- №	
106	Осаждение poly-Si 0,6 мкм					Канал- dx= № №	
107	Ионное легиров. ФОСФОР					$D = 500 \text{ мкКл/см}^2$ $E = 80 \text{ КэВ}$ №уст-	
108	ХО-2					ХО- №у- №	
109	Осаждение poly-Si 0,6 мкм					Канал- dx= № №	
110	Ионное легиров. ФОСФОР					$D = 500 \text{ мкКл/см}^2$ $E = 80 \text{ КэВ}$ №уст-	
111	ХО-2					ХО- №у- №	
112	Осаждение poly-Si 0,6 мкм					Канал- dx= № №	

ПШ А – ХХХ Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
113	Ионное легиров. ФОСФОР					$D = 500 \text{ мкКл/см}^2$ $E = 80 \text{ КэВ}$ №уст-	
114	ХО-2					ХО- №у- №	
115	Осаждение LTO SiO_2 0.25 мкм					Канал- dx= № / № /	
116	8 АНФ					№тр-	
117	Контроль 8 ФК ПШ А–ХХХ-08 «Мембрана»					Дефектность № С ведущим технологом	
118	РИТ ЛТО SiO_2 0.25 мкм					№уст t= №	
119	РИТ poly-Si 2,5 мкм					№уст t= №	
120	ПХ снятие ф\р					№уст t= №	
121	Сн. ф\р в КАРО					№ №	
122	Хим. травление ЛТО SiO_2 0.25 мкм					Б.Т. t= 2 мин	
123	Ионное легиров. ФОСФОР					$D = 500 \text{ мкКл/см}^2$ $E = 80 \text{ КэВ}$ №уст-	
124	ХО-1					ХО- №у- №	

ПШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
125	Вакуумное осаждение Al 1,1 мкм					Уст.№ d _x =	
126	9 АНФ					№тр-	
127	Контроль 9 ФК ПШ А–XXX-09 «Al КП»					Дефектность № С ведущим технологом	
128	РИТ Al 1,1 мкм					Уст. № t =	
129	ПХ снятие ф/р					№уст t= №	
130	ПХ осаждение Si ₃ N ₄ пассивации 0,8 мкм					Уст.№ d _x =	
131	10 АНФ					№тр-	
132	Контроль 9 ФК ПШ А–XXX-09 «Al КП»					Дефектность № С ведущим технологом	
133	ПХТ Si ₃ N ₄ пассивации 0,8 мкм					Уст. № t =	
134	ПХ снятие ф/р						
135	Дисковая резка пластин на крист					Алмазный диск; с защитной пленкой	Сбороч. произ- водство
136	Раскладка кристаллов в ячейки кассеты						Сбороч. произ- водство

ПШ А – XXX Базовый маршрут МК MEMS			XXXX LL-22-A001				
№	Операция	Дат	Нач	Кон	Пл	Параметры и режимы	Таб. №
137	Защита Al КП лаком ХСЛ						
138	Хим. вытравли- вание SiO ₂ и ФСС из-под мембраны					Б.Т.; в кассете; t _{трав} = 50 мин. с ведущим технологом	Лаб. 7113
139	Промывка в проточной деионизованной воде					Деиониз. вода; в кассете; t _{пром} = 3 часа	Лаб. 7113
140	Промывка в 3-х ваннах с ОСЧ ИПС					ИПС осч; в кассете	Лаб. 7113
141	Сушка чипов в кассете					Сушил. шкаф, T= 70° С t _{сушки} = 2 часа	Лаб. 7113
142	ПХ обработка чипов в кассете					Кварцевая кассета; в режиме снятия ф/р	Лаб. 7111

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (МЭМС И НЭМС). СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА	9
1.1. Место технологий МЭМС И НЭМС в современном приборостроении.....	9
1.2. Современные исследования по созданию преобразователей физических величин на основе туннельного эффекта.....	21
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УЧЭ ТУННЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	36
2.1. Конечноэлементный расчет напряженно-деформированного состояния многослойных УЧЭ туннельных преобразователей..	36
2.1.1. Методика расчета динамического напряженно-деформированного состояния многослойных пластин...	36
2.1.2. Пример применения изложенной методики для расчета прогиба диафрагмы УЧЭ туннельного преобразователя под действием внешней нагрузки.....	42
2.2. Анализ эффекта схлопывания электродов (pull-in instability) электростатического актюатора УЧЭ туннельного преобразователя.....	47
2.2.1. Простейшая модель упругого элемента – пластина на упругом подвесе.....	49

2.2.2. Упругий элемент – диафрагма конечной толщины и произвольной геометрии.....	55
2.2.3. Особенности функционирования электростатических актюаторов с субмикронным межэлектродным зазором. Расчет отклонения диафрагменного актюатора под действием электрического поля.....	57
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРШРУТА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОДВИЖНЫХ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР ДИАФРАГМЕННОГО И БАЛОЧНОГО ТИПА.....	66
3.1. Первый этап разработки технологии изготовления УЧЭ. Эскизный технологический маршрут. Изготовление первой экспериментальной партии образцов. Специальные операции формирования рельефа иглы и платиновой металлизации.....	70
3.1.1. Характеристики конструкции и технологического процесса изготовления первых образцов УЧЭ монолитного туннельного преобразователя.....	70
3.1.2. Формирование кремниевого микрорельефа «иглы».....	72
3.1.3. Результаты контроля экспериментальных образцов, изготовленных по эскизному технологическому маршруту (первого этапа разработки).....	75
3.2. Второй этап разработки технологии изготовления УЧЭ. Отработка технологии нанесения рисунка металлизации.....	80
3.2.1. Общие характеристики топологии тестовых структур и технологического процесса второго этапа разработки....	80
3.2.2. Разработка технологии формирования рисунка металлизации.....	82
3.2.2.1. Разработка технологического процесса формирования рисунка металлизации на основе платины.....	82

3.2.2.2. Разработка технологического процесса формирования рисунка металлизации на основе силицида платины.....	86
3.2.2.3. Исследование структурных и электрофизических характеристик электродов из силицида платины на различных стадиях технологического процесса.....	87
3.2.3. Результаты РЭМ-контроля экспериментальных образцов, изготовленных по технологическому маршруту второго этапа разработки.....	90
3.2.4. Результаты электроизмерений экспериментальных образцов, изготовленных по технологическому маршруту второго этапа разработки.....	95
3.2.5. «Закоротки» и обрывы проводников. Механизмы возникновения и методы борьбы.....	100
3.3. Рекомендации к выполнению третьего этапа разработки технологии изготовления УЧЭ туннельного преобразователя...	103
ГЛАВА 4. БЕСКОНТАКТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	105
4.1. Интерференционные оптические методики контроля смещений диффузно отражающих микрообъектов.....	105
4.2. Применение методов голографической интерферометрии повышенной чувствительности для контроля микросмещений диффузно отражающих элементов микро- и наномеханических устройств.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
ЛИТЕРАТУРА.....	123
ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	139

ПРИЛОЖЕНИЕ 1	144
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	163
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	184
ОГЛАВЛЕНИЕ	197

Для заметок

Для заметок

