

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
(ТУСУР)**

Кафедра физической электроники

Мухачёв В.А.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОСИСТЕМНОЙ
ТЕХНИКИ**

*Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим
занятиям и самостоятельной работе для студентов направления
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», профиль
«Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике»*

Томск-2014

Мухачёв В.А.

Физические основы микро- и наносистемной техники. Учебно-методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 18 с.

© Мухачёв В.А., 2014

© Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	5
2. Темы индивидуальных заданий.....	5
3. Термо- и термопневматические актиоаторы.....	5
3.1. Термоактиоаторы.....	5
3.2. Технология поверхностной микрообработки.....	7
3.3. MUMPs-технология.....	8
3.4. Термопневматические актиоаторы.....	10
3.5. Технология объемной микрообработки.....	11
3.6. LIGA-технология.....	15
4. Пьезоэлектрический и электростатический актиоаторы.....	17
5. Литература.....	18

1. Введение

Данное методическое пособие содержит варианты индивидуальных заданий (ИЗ) по всем темам дисциплины и пример выполнения одного ИЗ.

Особенностью выполнения ИЗ по этой дисциплине является необходимость изучения литературных источников по некоторым темам еще до того, как будет прочитан этот материал на лекции. Поэтому срок выполнения задания растягивается почти на весь семестр. И второе – оценка за ИЗ будет учитываться при сдаче экзамена.

2. Темы индивидуальных заданий

- 2.1. Интегральное микромеханическое реле. Расчет частоты срабатывания реле.
- 2.2. Микрозеркала с электростатическими актиuatorами.
- 2.3. Микрозеркала с гребенчатыми электростатическими актиuatorами.
- 2.4. Планарные электростатические микродвигатели.
- 2.5. Планарные электродвигатели на основе тонких сегнетоэлектрических пленок.
- 2.6. Пьезорезистивные и пьезоэлектрические чувствительные элементы.
- 2.7. Емкостные чувствительные элементы.
- 2.8. Чувствительные элементы на поверхностных акустических волнах.
- 2.9. Сенсоры температуры на основе термопар.
- 2.10. Сенсоры магнитного поля.
- 2.11. Сенсоры угловых скоростей. Микромеханические сенсоры угловых скоростей.
- 2.12. Волоконно-оптический гироскоп.
- 2.13. Микромеханические акселерометры L-типа.
- 2.14. Микромеханические акселерометры R-типа.
- 2.15. Акселерометры с нагреваемой пластиной и с нагреваемым газом.
- 2.16. Индуктивные элементы микросхем, индукторы из лиандров.

Примечание. Микросистемная техника в настоящее время бурно развивается, поэтому возможны изменения и дополнения в список тем индивидуальных заданий.

Ниже приводится пример выполнения одного индивидуального задания.

3. Термо- и термоневматические, пьезоэлектрические и электростатические актиuatorы

3.1. Термоактиuatorы

С начала 90-х годов прошлого века одним из наиболее динамично развивающихся научно-технических направлений является разработка и применение микросистем (МСТ – микросистемная техника). Элементами микросистемной техники называют устройства с интегрированными в объеме или на поверхности твердого тела электрическими, оптическими и микромеханическими структурами.

Актиuator – это механическое устройство, преобразующее разные виды энергии (электрическую, химическую или магнитную) в механическую работу, в излучение тепла или света. В настоящее время разработаны термические,

термопневматические, пьезоэлектрические, электростатические и магнитные актуаторы (рис.3.1).

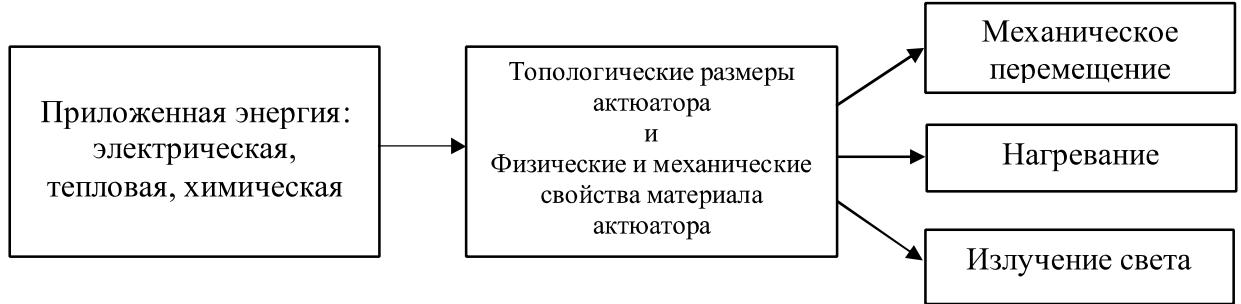


Рис.3.1. Преобразование входной энергии в работу актиоатора

Термоактиоаторы были разработаны одними из первых и использовались в сенсорах (датчиках) измерения потоков жидкости и газов. Основное применение термоактиоаторы нашли в механизмах горизонтального и вертикального поворота структур элементов МСТ.

Принцип работы термоактиоаторов основан на тепловом расширении структурных материалов элементов МСТ. Если при однородном нагреве температура твердого тела возрастает на ΔT , то тело и спытывает деформацию, описываемую следующим выражением:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}; \quad \varepsilon = \alpha \cdot \Delta T, \quad (3.1)$$

где:

l_0 – первоначальный размер тела;

Δl – абсолютное удлинение;

ε – относительное удлинение;

α – коэффициент теплового расширения.

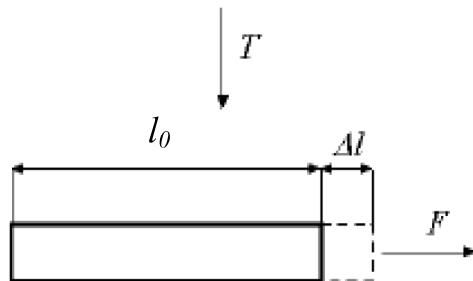


Рис.3.2. Деформация термоактиоатора при нагреве

Напряжение называется физическая величина, равная упругой силе, приходящейся на единицу площади сечения тела:

$$\sigma = \frac{F_m}{S}, \quad (3.2)$$

где F – сила, S – площадь сечения, расположенная перпендикулярно нормали силы F .

По закону Гука сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня, вызывает изменение длины тела Δl . Величина Δl зависит от размеров стержня, материала и величины приложенной силы:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (3.3)$$

где E – модуль Юнга.

Подставив (3.1) и (3.2) в (3.3), получим выражение для определения силы, создаваемой термоактуатором:

$$F_m = W \cdot h \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (3.4)$$

где W – ширина, h – толщина стержня.

Термоактуаторные элементы МСТ изготавливаются по технологии поверхностной микрообработки и МИМР-технологии.

3.2. Технология поверхностной микрообработки

Поверхностная микрообработка основана на осаждении тонких слоев на поверхности подложки и травлении одного или нескольких слоев для освобождения структуры. Удаляемые слои называются жертвенными. Освобождение подвижных частей (структурных слоев) сенсорных и актуаторных элементов (удаление жертвенных слоев) производится на последнем этапе процесса изготовления.

В качестве жертвенных слоев могут быть использованы следующие материалы: SiO_2 , Si_3N_4 , GaAs, AlGaAs, Al, фосфоросиликатное стекло, боросиликатное стекло, AlN. На рис. 3.3 приведен сенсор давления емкостного типа, изготовленный по технологии поверхностной микрообработки.

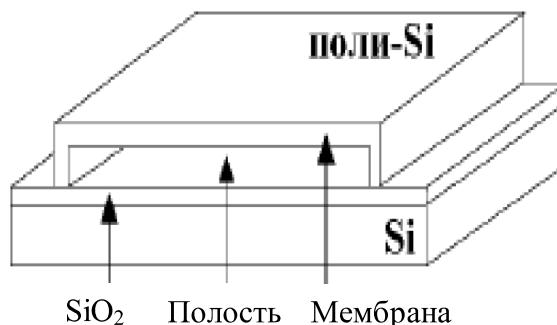


Рис.3.3. Пример элемента МСТ, изготовленный по технологии поверхностной микрообработки

Механические свойства материалов, используемых в качестве структурных слоев элементов МСТ, проведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Механические свойства структурных материалов

Структурный материал	Модуль Юнга (E), Г Па	Модуль сдвига (G), ГПа	Коэффициент Пуассона (μ)	Плотность (ρ), кг/м ³
Кремний (Si)	130	50	0,28	2320
Поликремний (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбид кремния (SiC)	270	103	0,31	3200
Оксид кремния (SiO_2)	75	32	0,17	2190
Нитрид кремния (Si_3N_4)	270	106	0,27	3440

К достоинствам данной технологии можно отнести возможность создания большого количества различных сенсорных и актиuatorных элементов МСТ в одном и том же процессе изготовления при незначительных изменениях и совместимость с технологией интегральных схем (ИС).

К недостаткам следует отнести прилипание тонких подвешенных частей элементов МСТ к подложке, возникающее в процессе промывания продуктов травления жертвенных слоев и при работе элемента.

3.3. MUMPs-технология

MUMPs-технология (Multi User MEMS Process) представляет собой трехслойный поликремниевый процесс стандартной технологии поверхностной микрообработки. Процесс состоит из создания слоя изоляции Si_3N_4 , осажденного слоя поликремния (poli 0), двух структурных слоев поликремния (poli 1 и poli 2), двух жертвенных слоев (0x1 и 0x2) и одного слоя металла (metal).

В качестве жертвенных слоев могут быть использованы те же материалы, что и в технологии поверхностной микрообработки. Первый слой (poli 0) поликремния представляет собой жесткую плату, на которой располагаются подвижные части элементов МСТ, построенные на основе остальных двух кремниевых слоях (poli1 и poli 2).

Проблема прилипания подвешенных частей элементов МСТ, изготовленных по MUMPs-технологии, была решена с помощью предохранителей (dimple), которые размещаются под первым структурным слоем поликремния.

На рис.3.4 показаны основные этапы изготовления актиuatorного элемента МСТ на основе MUMPs-технологии.

Процесс начинается с создания диффузионного слоя нитрида кремния (nitride) и осаждения слоя поликремния (poly0) (рис.3.4,а). Далее производится осаждение первого жертвенного слоя (ox1) и формирования в нем предохранителей (dimple) и контактов (якорей) первого структурного слоя (anchor1) к подложке и/или poly0 (рис.3.4,б). После нанесения первого структурного слоя (poly2) производится формирование микромеханических структур элементов МСТ и нанесение второго жертвенного слоя (ox2). С помощью травления во втором жертвенном слое формируются контакт второго структурного слоя (anchor2) к подложке и/или poly0 и контакты второго структурного слоя к первому (P1_P2_Via) (рис.3.4,в.). Далее производится осаждение второго структурного слоя и формирование в нем различных частей элементов МСТ (рис.3.4,г). На последнем этапе процесса производится металлизация и освобождение структуры элементов МСТ с помощью удаления первого и второго жертвенных слоев (рис.3.4,д).

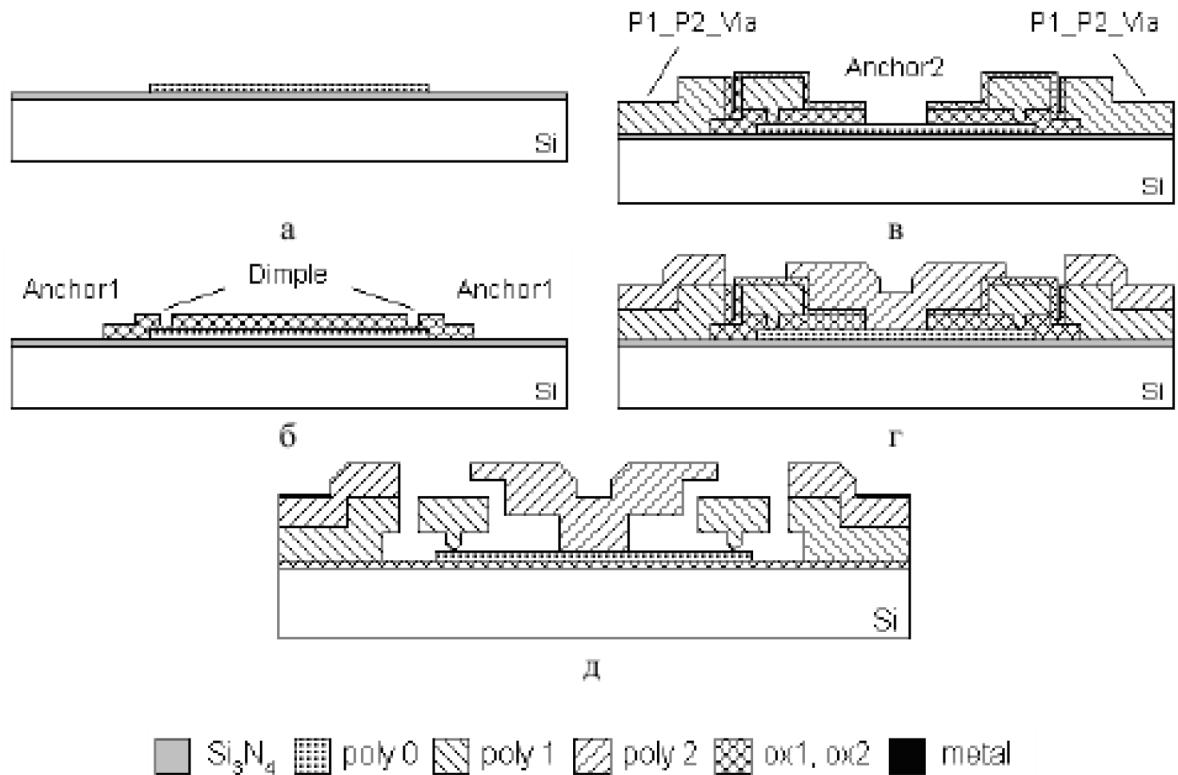


Рис.3.4. Основные этапы изготовления элементов МСТ с использованием MUMPs-технологии:

- а – создание слоя изоляции и осаждение poly0;
- б – осаждение ox1, формирование предохранителей и контактов;
- в – осаждение poly1 и ox2, формирование структуры элемента;
- г – осаждение poly2 и формирование структуры элемента МСТ;
- д – осаждение metal и удаление ox1 и ox2

По данной технологии изготавливается большинство планарных элементов МСТ. Использование поликремния в качестве структурного материала сенсорных и актиuatorных элементов микросистемной техники в MUMPs-технологии обосновывается тем, что данный материал обладает хорошими механическими свойствами. Отлаженные технология и методы фотолитографии позволяют создавать сенсорные и актиuatorные элементы МСТ в одном технологическом процессе с микроэлектронными устройствами ИС.

Недостатком данной технологии является невозможность изготовления элементов МСТ из другого материала, кроме как из поликремния.

Достоинством MUMPs-технологии (как и поверхностной микрообработки) является возможность создания большого количества различных по функциональному назначению элементов МСТ в одном процессе изготовления с незначительными изменениями, а также возможность интегрального создания сенсорных и актиuatorных элементов на одной подложке с элементами обработки, передачи и хранения информации. Кроме того, планарные многоуровневые актиuatorные элементы имеют большую функциональность по сравнению с конструкциями тех же размеров, созданных с использованием объемной микрообработки.

3.4. Термопневматические актиоаторы

Дальнейшее развитие термоактиоаторы получили в виде термопневматических актиоаторов. Данный тип актиоаторов содержит нагревательный элемент и герметичную полость с упругой мембраной (рис.3.5).

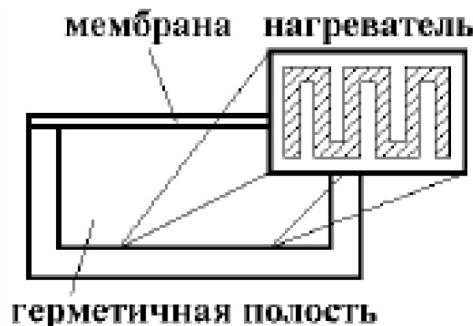


Рис.3.5. Термопневматический актиоатор

Нагреватель представляет собой полупроводниковый резистор меандрового типа. Электрический ток протекает через резистор и нагревает его. Количество теплоты, выделяемое в нагревателе:

$$Q = \frac{U^2 \cdot t}{R}, \quad (3.5)$$

где

U – напряжение на нагревателе;

t – время прохождения тока;

R – сопротивление нагревателя.

В результате происходит расширение газовой среды в герметичной области, что приводит к деформации мембраны. Так как объем герметичной области остается постоянным, то изменение давления в полости описывается следующим выражением:

$$\rho_T = \rho_0 \cdot \beta \cdot T, \quad (3.6)$$

где ρ_0 – давление газа до нагревания;

β – коэффициент объемного расширения;

T – температура нагревания.

Коэффициент объемного расширения практически одинаков у всех газов и с хорошим приближением равен коэффициенту объемного расширения идеального газа: $\beta=0,00366 \text{ K}^{-1}$.

Сила, создаваемая термопневматическим актиоатором:

$$F_{\text{пп}} = S \cdot \rho_0 \cdot \beta \cdot T, \quad (3.7)$$

где S – площадь мембраны.

Термопневматические актиоаторы изготавливаются по технологии объемной микрообработки и LIGA-технологии.

3.5. Технология объемной микрообработки

Переднесторонняя объемная микрообработка основана на селективном травлении передней (лицевой) поверхности подложки. Основным достоинством объемной микрообработки является формирование интегральных элементов МСТ селективным травлением на последнем этапе процесса изготовления, непосредственно в объеме подложки.

В качестве маски при травлении могут быть использованы металлизированные или пассивирующие слои.

На рис.3.6 приведена консольная балка, изготовленная по технологии переднесторонней объемной микрообработки.

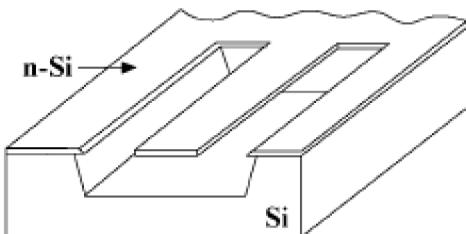


Рис.3.6. Пример элемента МСТ,
изготовленного с помощью переднесторонней
объемной микрообработки

Заднесторонняя объемная микрообработка основана на травлении подложки с задней стороны. Существуют два способа изготовления сенсорных и актиuatorных элементов при заднесторонней объемной микрообработке . При первом способе создания элементов МСТ на переднюю сторону подложки наносится эпитаксиальный слой, выполняющий функцию стоп-слоя, и выполняется добавочное маскирование задней стороны подложки. Далее, производится селективное травление задней стороны подложки до стоп-слоя.

На рис.3.7 приведена мембрана, изготовленная с помощью селективного травления заднесторонней объемной микрообработки с использованием стоп-слоя.

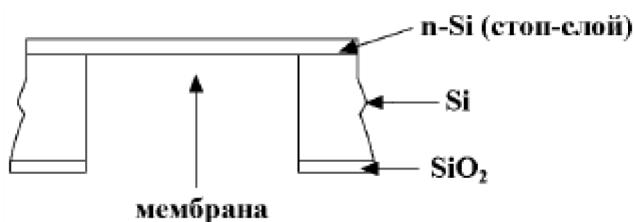


Рис.3.7. Пример элемента МСТ, изготовленного
с помощью заднесторонней объемной микрообработки

При применении данного способа селективного травления заднесторонней микрообработки, необходимо обеспечить высокую селективность системы подложка – стоп-слой.

Данная техника изготовления позволяет стравливать до нескольких сотен микрометров материала подложки и останавливаться на глубине, точно

определенной стоп-слоем. Таким образом, данная техника изготовления позволяет создавать элементы МСТ с маленькой толщиной.

При втором способе создания сенсорных и актиоаторных элементов используются специальные управляющие отверстия, которые первоначально создаются с передней стороны подложки, а также выполняется добавочное маскирование задней стороны подложки. Глубина управляющих отверстий определяет толщину создаваемых элементов МСТ. Травление останавливается, когда переднесторонние управляющие отверстия становятся видимыми.

На рис.3.8 приведена мембрана, изготовленная по методу заднесторонней объемной микрообработки с управляющими отверстиями.

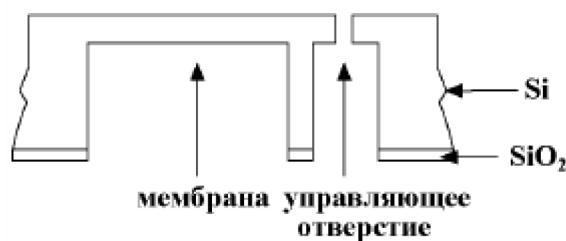


Рис.3.8. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью заднесторонней объемной микрообработки

Данная техника изготовления позволяет создавать элементы МСТ большой толщины непосредственно в подложке. Существенным недостатком данного способа изготовления является невозможность создания структур сенсорных и актиоаторных элементов с маленькой толщиной.

Комбинированный метод объемной микрообработки основан на использовании переднесторонней и заднесторонней объемных технологий изготовления элементов МСТ.

На рис.3.9 приведена мембрана, изготовленная по методу комбинированной объемной микрообработки.

При применении технологии объемной микрообработки используются изотропное и анизотропное травление материала подложки.

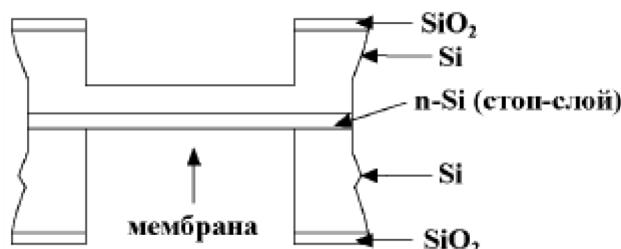


Рис.3.9. Пример элемента МСТ, изготовленного с помощью комбинированной объемной микрообработки

Изотропное травление является одним из самых известных и распространенных способов локальной микрообработки. Характерной особенностью изотропного травления является тот факт, что кристаллографическая ориентация подложки не влияет на профиль травления.

На рис.3.10 приведен пример объемной микрообработки подложки из монокристаллического кремния с помощью изотропного травления.

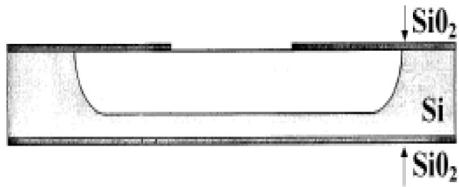


Рис.3.10. Пример объемной микрообработки при изотропном травлении

В качестве изотропных травителей используются травители на основе плавиковой и азотной кислот. Медный травитель содержит $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ (7 : 1 : 3) и используется для получения мелких рельефов при скорости травления около 0,1 мкм/мин. Быстрый травитель имеет такой же состав, но в соотношении (3 : 1 : 1) и используется для получения глубоких рельефов при скорости около 4-8 мкм/мин.

Скорость травления подложки зависит от большого числа факторов: тип травителя, его температура; скорость отвода продуктов травления, наличие или отсутствие дефектов в материале подложки и т.д. Большинство этих факторов плохо поддаются контролю. Таким образом, невоспроизводимость скорости травления вносит основной вклад в невоспроизводимость геометрии микромеханических элементов МСТ.

Специфическая форма объемной микрообработки, а также сложность обеспечения локальной защиты от длительного воздействия травителя не позволяет рассматривать изотропное травление как перспективный способ микрообработки .

В процессе анизотропного травления удаление материала подложки происходит с разной скоростью в зависимости от кристаллографической ориентации подложки. Это объясняется различной плотностью упаковки атомов в разных плоскостях, а также различным характером связи поверхностных атомов между собой и с атомами, расположенными в объеме подложки. Скорость травления в зависимости от кристаллографического направления соответствует следующему ряду:

$$V_{<100>} > V_{<110>} > V_{<210>} > V_{<211>} > V_{<221>} > V_{<111>}.$$

Для получения микромеханических структур элементов МСТ подложки чаще всего ориентируют в плоскостях $<100>$, $<110>$, $<111>$.

Типичное значение отношения скорости травления в направлении $<100>$ к скорости травления в направлении $<111>$ составляет:

$$V_{<100>}:V_{<111>}=400:1.$$

Анизотропные травители представляют собой многокомпонентные растворы, состоящие из окислителя кремния до гидратированной двуокиси, растворителя ее и замедлителя или ускорителя процесса травления.

Процесс анизотропного травления представляет собой поэтапное удаление атомных слоев с поверхности подложки, т.е. в процессе травления на поверхности подложки образуются микроскопические ступеньки. Таким образом, анизотропное травление не дает зеркальных поверхностей и микромеханическая структура обрабатывается в течение 30 секунд в полирующим растворе изотропного травителя, состоящего из смеси плавиковой, уксусной и азотной кислот в пропорции 1 : 1,2 : 6,2. Полирующий раствор устраняет микрошероховатость поверхности, что

повышает предел прочности микромеханических структур элементов МСТ в 3-4 раза.

На рис.3.11 – приведены примеры объемной микрообработки монокристаллического кремния с помощью анизотропного травления.

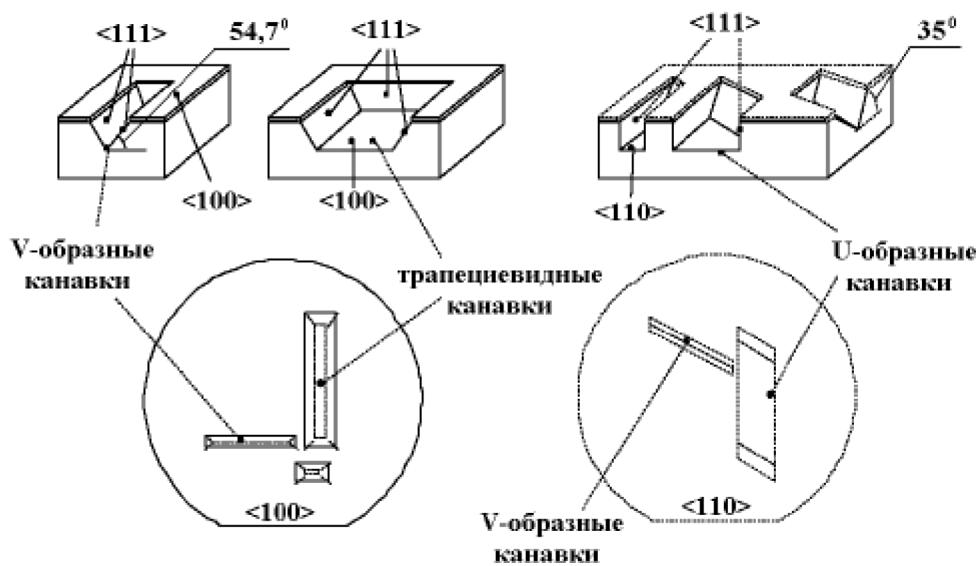


Рис.3.11. Анизотропное травление подложки в плоскостях $<100>$ и $<110>$

Возможность получения практически перпендикулярных боковых стенок позволяет экономить площадь подложки более чем на 30% .

По сравнению с изотропным травлением монокристаллического кремния травление поликристаллического кремния приводит к несколько худшей воспроизводимости формы микромеханических структур элементов МСТ из-за существенно большей неоднородности поликристалла. Однако, по сравнению с изотропным травлением, этот процесс характеризуется определенной направленностью. Боковое подтравливание под край маски происходит медленнее, чем травление в глубину. Форма получаемого при травлении поликремния профиля приведена на рис.3.12.

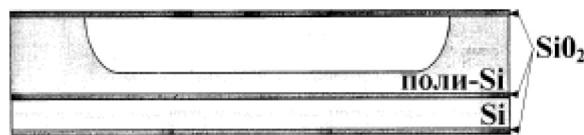


Рис.3.12. Форма профиля при травлении поликремния

Технология объемной микрообработки имеет ограничения в возможности создания поверхностных топологических фигур сенсорных и актиuatorных элементов микросистемной техники, поскольку их конфигурация определяет и объемный результат травления (наклон стенок и глубину травления).

3.6. LIGA-технология

Основными технологическими операциями в процессе изготовления элементов микросистемной техники, как и в ИС, являются литография и травление. Но при изготовлении элементов ИС основной задачей является смещение процесса литографии в субмикронную область, тогда как при изготовлении элементов МСТ – достижение большей глубины трехмерного рельефа топологического рисунка.

Для получения высоких аспектных отношений микромеханических структур элементов МСТ (от 50 : 1 до 100 : 1 при существующем современном уровне 6 : 1 (см. табл.3.1) используется LIGA-технология.

LIGA-технология (аббревиатура немецких слов: Lithographie (литография), Galvanoformung (гальваноосаждение) и Abformung (микроформирование)), основанная на последовательности процессов литографии, гальваноосаждения и микроформирования, предлагает широкий спектр материалов для создания ультраточных трехмерных элементов МСТ с вертикальными боковыми сторонами, толщиной до 100-1000 мкм и поперечными размерами в пределах нескольких микрон.

Для достижения большей толщины (высоты) элементов микросистемной техники используется толстый слой резиста, наносимый на подложку. В качестве абсорбента используется золото, наносимое на тонкую пластину. Создание фотоэлектронного рисунка в резисте производится с использованием рентгеновских лучей от синхротрона, которые проходят через толстый слой резиста с очень маленькой боковой экспозицией. Синхротронное излучение имеет сверхмалый угол расходимости пучка (0,0060), т.е. формируется пучок параллельных лучей.

Существуют некоторые вариации LIGA-технологии, когда дорогостоящая рентгенолитография заменяется электронно-лучевой или лазерной литографией .

На рис.3.13 приведены основные этапы изготовления микромеханической структуры элемента МСТ на основе LIGA-технологии.

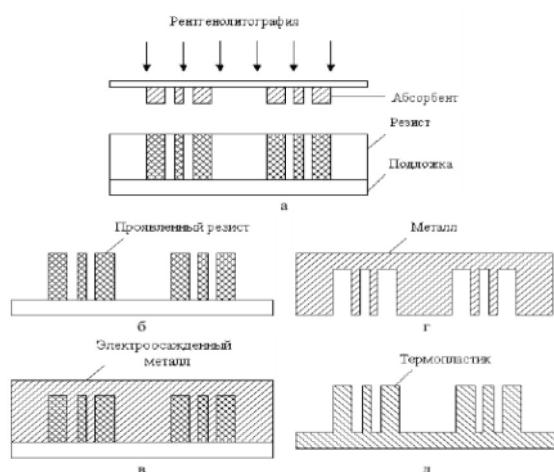


Рис.3.13. Основные этапы изготовления элементов МСТ с использованием LIGA-технологии:

- а – создание фотоэлектронного рисунка элемента МСТ в резисте;
- б – проявление резиста;
- в – гальваноосаждение металла;
- г – формирование шаблона;
- д – формирование микромеханической структуры элементов МСТ

Процесс изготовления микромеханических структур элементов МСТ начинается с создания фотоэлектронного рисунка в резисте (см. рис.3.13,а). Последующее проявление резиста (см. рис.3.13,б) и гальваноосаждение металла позволяют получить металлическую микроструктуру (см. рис.3.13,в.). После удаления резиста металлическая микроструктура может быть использована либо непосредственно в качестве микромеханической структуры элементов МСТ (см. рис.3.13,г), либо применена в качестве формы (шаблона) для изготовления микромеханических структур сенсорных и актиuatorных элементов из термопластика, смол или керамики (см. рис.3.13,д).

В процессе гальваноосаждения применяются как стандартные материалы и сплавы, используемые в полупроводниковой промышленности, так и новые разработанные материалы и сплавы.

В табл.3.2 приведены материалы, используемые в процессе гальваноосаждения в LIGA-технологии.

Таблица 3.2

**Материалы, используемые для формирования
элементов МСТ в LIGA-технологии**

Применения	Материалы		Справы	
	Стандартные	Новые	Стандартные	Новые
Формовка	Ni, Cu	-	Ni-Co	Ni-W, Co-W
Абсорбенты для рентгенолитографии	Au	-	-	-
Микромеханизмы	Ni		Ni-Co, Ni-P	Ni-B
Актюаторные элементы	Fe	-	Ni-Fe	-
Сенсорные элементы	-	Pd	-	Ni-W
Жертвенные слои	Cu, Zn	-	-	-
Функциональное покрытие	Ag, Au, Cu, Zn	Cr, Pd	-	Cu-Zn
Электрические контакты	Au, Cu	Pd	-	-
Другие	Ag, Cu	-	-	Sm-Co

Достоинством LIGA-технологии является возможность создания элементов МСТ большой толщины с вертикальными сторонами. А также возможность создания сенсорных и актиuatorных элементов из различных материалов – металла, пластика и керамики.

Основными недостатками данной технологии является необходимость использования уникальных источников синхротронного излучения и нетрадиционность технологий, связанная с гальванопластикой на микроуровне. Кроме того, наличие в процессе изготовления элементов МСТ операции микросборки не позволяет использовать LIGA-технологию для их группового изготовления.

4. Пьезоэлектрический и электростатический актуаторы

Более простым вариантом термопневматического актуатора является пьезоэлектрический актуатор. Данный тип актуаторов содержит пьезоэлектрический диск и упругую мембрану (рис.4.1).

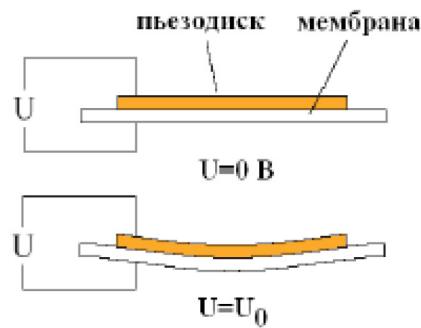


Рис.4.1. Структура пьезоэлектрического актуатора

В основу работы пьезоэлектрических актуаторов положен обратный пьезоэлектрический эффект: под действием электрического поля в пьезоэлектриках появляется механическая деформация.

При обратном пьезоэффекте электрическое поле и деформация актуатора связывают те же пьезоэлектрические коэффициенты, что и в прямом пьезоэффекте:

$$\varepsilon_{ij} = \Pi_{ij} \cdot E_i, \quad (4.1)$$

где ε_{ij} – тензор относительной деформации;

Π_{ij} – тензор пьезо коэффициентов материалов;

E_i – напряженность электрического поля.

В качестве материалов пьезоэлектриков используются кварц, LiTaO_3 и ZnO .

Данный тип актуаторных элементов изготавливается с использованием технологии объемной микрообработки и LIGA-технологии.

Следующим типом актуаторных элементов является электростатические актуаторы. В общем виде электростатический актуатор содержит подвижный и неподвижный электроды (рис.4.2).



Рис.4.2. Электростатический актуатор

В качестве подвижного электрода выступают консольные балки и мембранны. При подаче отклоняющего напряжения на неподвижны электрод относительно подвижного, на последний начинает действовать сила, определяемая выражением

$$dF_{\text{эл}} = E \cdot dq, \quad (4.2)$$

где E – напряженность электрического поля;
 q – заряд электрода.

Поскольку $dq = C \cdot dU$, а $E = \frac{U}{d}$, выражение (4.2) принимает вид:

$$dF_{\text{эл}} = \frac{C}{d} U \cdot dU. \quad (4.3)$$

Электростатическая сила, действующая на подвижный электрод, будет такой:

$$F_{\text{эл}} = \frac{C}{d} \int_0^U U \cdot dU = \frac{CU^2}{2d}, \quad (4.4)$$

где U – отклоняющее напряжение;

C – емкость, создаваемая подвижным и неподвижным электродами:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (4.5)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость воздушного зазора;

S – площадь подвижного электрода.

Подставив (4.5) в (4.4), получим

$$F_{\text{эл}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d^2}. \quad (4.6)$$

Под действием электростатической силы подвижный электрод притягивается к неподвижному, расстояние между электродами будет уменьшаться, что приведет к увеличению $F_{\text{эл}}$. Следовательно, результирующая сила, действующая на подвижный электрод, будет:

$$F_{\text{эл}} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{2(d-y)^2} U^2 \quad (4.7)$$

При изготовлении электростатических актиоаторов могут использоваться технологии поверхностной и объемной микрообработки и MUMPs-технология.

Как видно из приведенного примера, принцип работы многих устройств МСТ основан на простейших физических законах. Правда, практическое использование этих законов в микро- и наносистемной технике требует высочайшей точности и сложности в изготовлении соответствующих устройств (сенсоров и актиоаторов).

Литература

1. И.Е.Лысенко Проектирование сенсорных и актиоаторных элементов микросистемной техники. Учебное пособие.-Таганрог, изд-во ТРТУ, 2005.-103 с. [электронный ресурс] -<http://miel.tusur.ru>.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие.-М.: Машиностроение, 2007.-400 с. [электронный ресурс] -<http://miel.tusur.ru>.
3. Механцев Е.В. Физические основы микросистемной техники. Курс лекций.- Таганрог, изд-во ТРТУ, 2007.-126 с. [электронный ресурс] -<http://miel.tusur.ru>.
4. КОСЦОВ э.г. Состояние и перспективы микро- и наноэлектромеханики. Автометрия. 2009.- Т.45, №3.