

УДК 531.768

## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНЕРЦИОННЫХ СТРУКТУР МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРОВ МЕТОДОМ РЕАКТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Лидия Сергеевна Самохина

*Студентка 6 курса,  
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.Б. Цветков,  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные технологии в  
машиностроении»,  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

### **Введение**

В настоящее время быстро развиваются технологии микромеханики, или микроэлектромеханических систем (МЭМС). Главными достоинствами МЭМС являются миниатюрность, функциональность, надежность, малое энергопотребление и простота интегрирования. Все это делает МЭМС-устройства, в том числе акселерометры, востребованными на рынке электроники.

Технология создания МЭМС включает методы последовательного наращивания и травления по маске слоев различных материалов на поверхности кремниевой подложки. Данные способы микрообработки позволяют изготавливать чувствительный элемент, детектирующий значение физического параметра, и электронику, выполняющую функции обработки информации и формирования выходного сигнала, на одном кристалле [1].

Главной проблемой, возникающей при производстве МЭМС-акселерометров (датчиков ускорения), является эффект «залипания» - потеря подвижности чувствительным элементом прибора. Основной его причиной выступает адгезия, возникающая вследствие сил межмолекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями кремния. Контакт возможен при жидкостном травлении жертвенных слоев или при аварийном соприкосновении двух поверхностей. Одним из способов избежать залипания чувствительных структур при производстве МЭМС-акселерометров, является использование методов сухого реактивно-ионного травления. Данный способ не требует наличия дополнительного дорогостоящего оборудования и применения сложных методов сушки подложек.

Цель работы – экспериментально исследовать особенности топологии инерционных структур МЭМС-акселерометров при их высвобождении методом реактивно-ионного травления и, проанализировав полученные данные, сделать выводы о технологичности исследуемых топологий.

### **Принцип действия и структура чувствительного элемента ёмкостного микроакселерометра**

Рассмотрим одну из типовых структур чувствительного элемента МЭМС-акселерометра на примере микроакселерометра ёмкостного типа с гребенчатой структурой чувствительного элемента (рис. 1).

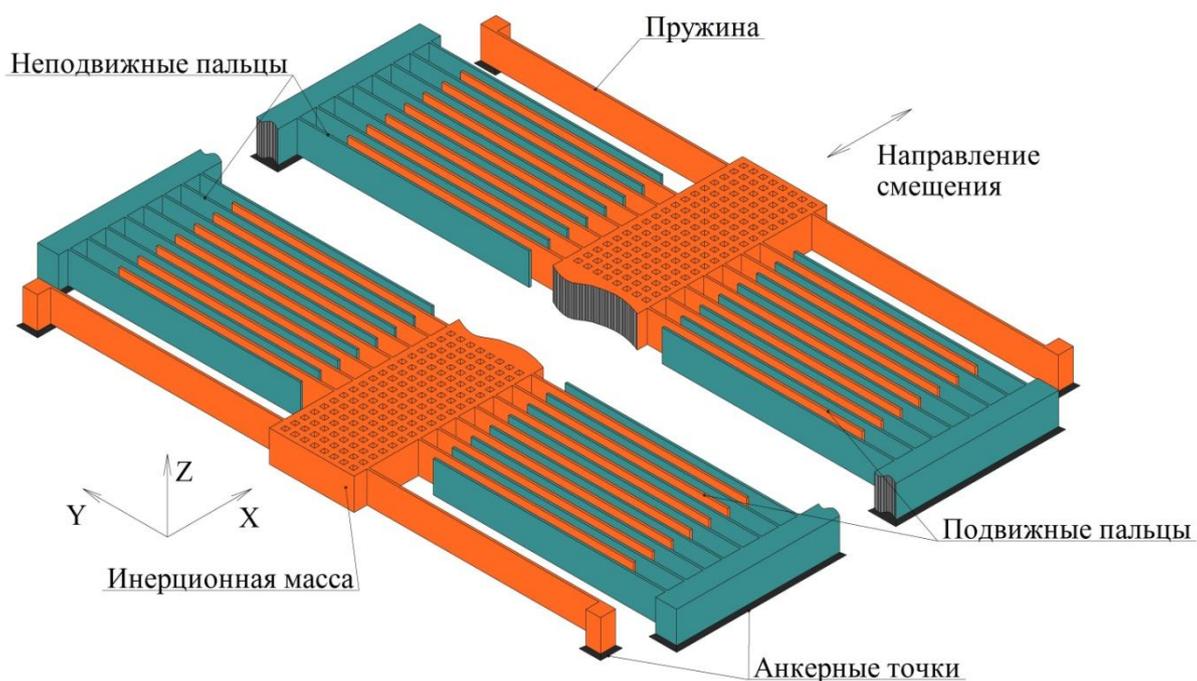


Рис. 1. Чувствительный элемент микроакселерометра ёмкостного типа с гребенчатой структурой

Чувствительный элемент включает инерционную массу, поддерживаемую с каждого конца двумя пружинами, закрепленными на подложке в анкерных точках. Подвижные пальцы составляют единое целое с инерционной массой и пружинами, образуя инерционную структуру. Неподвижные пальцы закреплены на подложке. Подвижные и неподвижные пальцы по виду напоминают гребень, отсюда и условное название таких структур. Ось чувствительности прибора – ось X.

Подвижные и неподвижные пальцы представляют собой маленькие пластины конденсаторов. Изменение ёмкости между пальцами может быть оценено с помощью считывания выходного сигнала электрической схемы. В начальном состоянии ускорение отсутствует, инерционная масса покоится в равновесном состоянии. Ёмкости между подвижными и неподвижными пальцами эквивалентны, а выходной сигнал равен нулю. При наличии внешнего ускорения по оси X баланс нарушается, ёмкость между пальцами изменяется на некую величину  $\Delta C$ . Это изменение считывается и конвертируется в сигнал напряжения с помощью выходной электрической схемы. Полученный сигнал пропорционален величине внешнего ускорения, т.е. искомой величине [2].

### Оборудование для проведения экспериментов

Эксперименты по травлению проводились на установках реактивно-ионного травления Plasmalab80Plus (рис. 2, слева). Рабочая камера установки снабжена источником индуктивно связанной плазмы (ВЧ катушка с электростатическим экраном) и нижним электродом с высокочастотным генератором, работающим на частоте 13,56 МГц, и согласующим устройством (рис. 2, справа). Такая система допускает возможность независимой регулировки плотности потока ионов (при варьировании мощности питающего генератора) и их энергии при взаимодействии с поверхностью (при варьировании величины отрицательного смещения на подложкодержателе). Вакуумная система состоит из турбомолекулярного насоса и

роторного (форвакуумного) насоса. Температура нижнего электрода может варьироваться в диапазоне от  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  с помощью системы подачи жидкого азота под управлением соответствующего контроллера. Газовый поток регулируется стандартными датчиками массового расхода. Давление в камере отслеживается с помощью системы датчиков (ёмкостный манометр и датчик Пеннинга) и автоматически контролируется дроссельным клапаном.

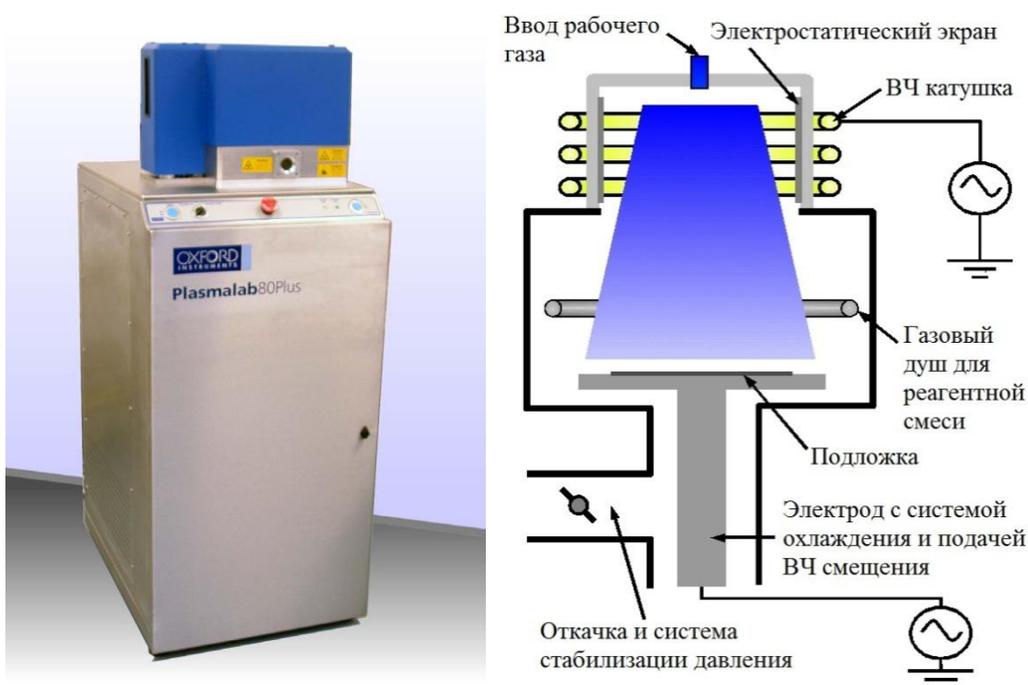


Рис. 2. Установка реактивно-ионного травления Plasmalab80Plus ([www.plasmasystem.ru](http://www.plasmasystem.ru))

### Технологический процесс изготовления чувствительного элемента микроакселерометра

Технологический процесс иллюстрирован рисунками, представляющими собой разрез инерционной структуры.

1. Термическое окисление кремния в диффузионной печи ( $360\text{\AA}$ ). Температура порядка  $950^{\circ}\text{C}$ .



Рис. 3. Термическое окисление кремния

2. Плазмохимическое осаждение слоя  $\text{SiO}_2$  ( $0,5\ \mu\text{m}$ ). Время осаждения  $t = 12\ \text{min}\ 30\ \text{s}$ , давление в камере  $P=1\ \text{Торр}$ , температура в камере  $T = 300^{\circ}\text{C}$ .

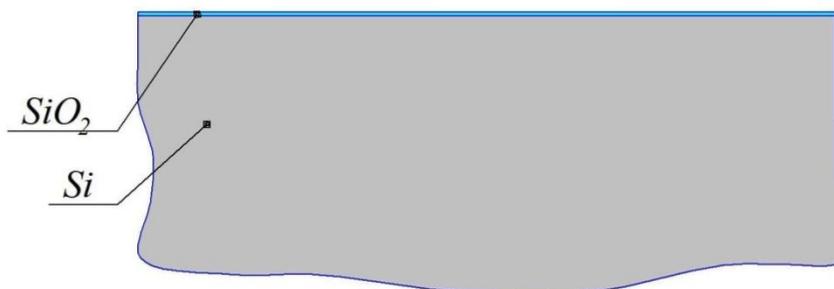


Рис. 4. Плазмохимическое осаждение слоя SiO<sub>2</sub>

3. Операция фотолитографии: наносим слой фоторезиста, производим экспонирование через фотошаблон, проявляем. На подложке получаем рисунок, соответствующий заданной топологии.

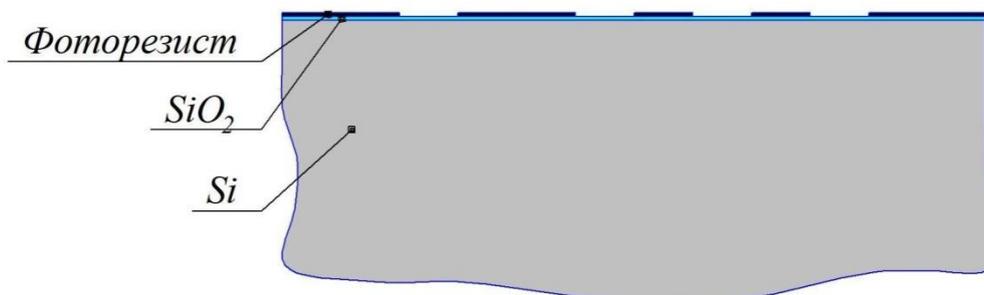


Рис. 5. Операция фотолитографии

4. Реактивно-ионное травление SiO<sub>2</sub>. Расход CHF<sub>3</sub> 15 см<sup>3</sup>/мин, расход Ar 35 см<sup>3</sup>/мин, мощность 200 Вт, T = 20<sup>0</sup>С, давление P = 30 мТорр, время травления t = 23-26 мин.

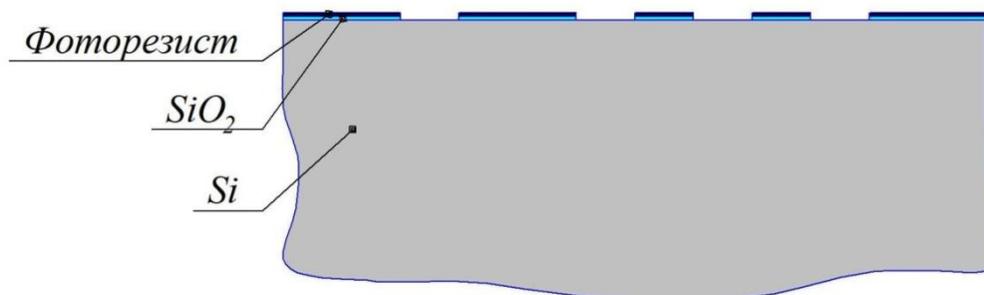


Рис. 6. Реактивно-ионное травление SiO<sub>2</sub>

5. Реактивно-ионное анизотропное травление кремния (15 мкм). Расход SF<sub>6</sub> 70 см<sup>3</sup>/мин, O<sub>2</sub> 10 см<sup>3</sup>/мин, He 10 см<sup>3</sup>/мин, мощность 90 Вт, T = -110<sup>0</sup>С, давление P = 100 мТорр, время травления t = 50 мин.

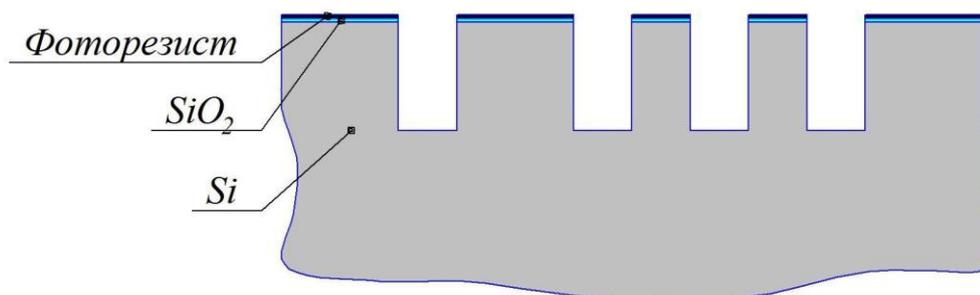


Рис. 7. Реактивно-ионное анизотропное травление кремния

6. Плазмохимическое снятие фоторезиста.

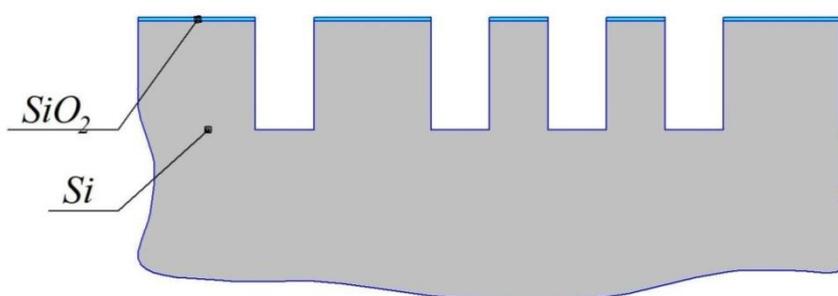


Рис. 8. Плазмохимическое снятие фоторезиста

7. Плазмохимическое осаждение слоя SiO<sub>2</sub> (0,5 мкм). Время осаждения  $t = 12$  мин 30 с, давление в камере  $P = 1$  Торр, температура в камере  $T = 300^{\circ}\text{C}$ .

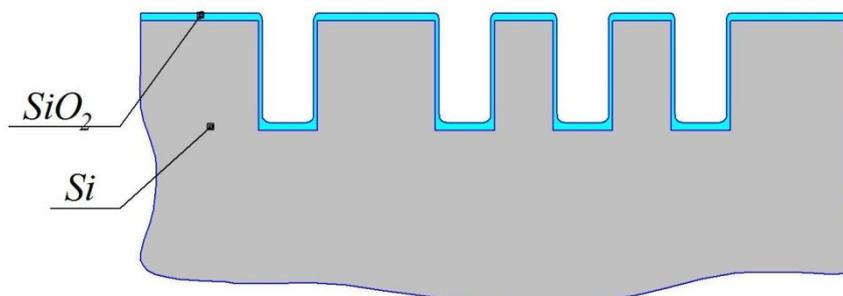


Рис. 9. Плазмохимическое осаждение слоя SiO<sub>2</sub>

8. Реактивно-ионное травление SiO<sub>2</sub>. Расход CHF<sub>3</sub> 15 см<sup>3</sup>/мин, расход Ar 35 см<sup>3</sup>/мин, мощность 200 Вт,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ , давление  $P = 30$  мТорр, время травления  $t = 23-26$  мин.

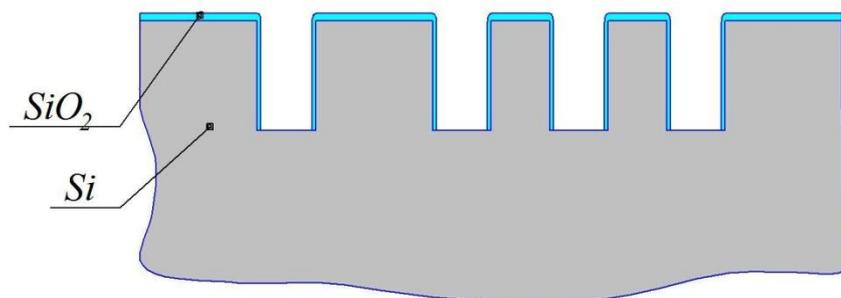


Рис. 10. Реактивно-ионное травление  $\text{SiO}_2$

9. Реактивно-ионное анизотропное травление Si. Расход  $\text{SF}_6$  70  $\text{см}^3/\text{мин}$ , расход  $\text{O}_2$  10  $\text{см}^3/\text{мин}$ , давление гелия под подложкой  $\text{He}=10$  Торр (гелиевая подушка),  $P = 100$  мТорр,  $E = 90$  Вт,  $T = -110^\circ\text{C}$ .

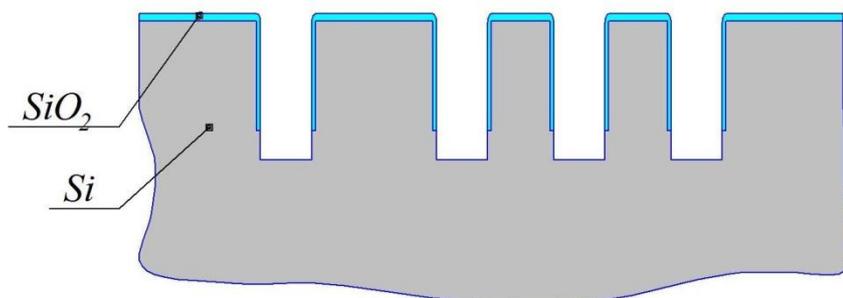


Рис. 11. Реактивно-ионное анизотропное травление Si

10. Реактивно-ионное изотропное травление Si. Расход  $\text{SF}_6$  90  $\text{см}^3/\text{мин}$ , расход  $\text{CHF}_3$  40  $\text{см}^3/\text{мин}$ , расход  $\text{He}$  30  $\text{см}^3/\text{мин}$ , рабочее давление в камере  $P = 24$  мТорр, мощность на электроде ICP 230 Вт, мощность на нижнем электроде 10 Вт, рабочая температура в камере  $T = 20^\circ\text{C}$ .

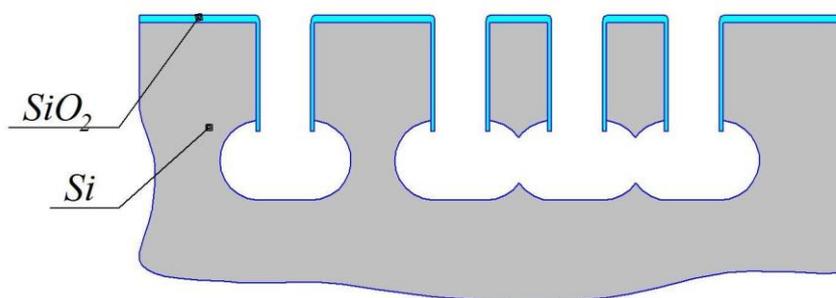


Рис. 12. Реактивно-ионное изотропное травление Si

### Исследуемые топологии инерционной массы

Всего в образцах присутствует 6 видов структур инерционных масс (рис. 13).

1. Квадратные ячейки 12x12мкм с шагом 30мкм (рисунок 13 – ИМ1).
2. Квадратные ячейки 12x12мкм с шагом 24мкм (рисунок 13 – ИМ2).

3. Квадратные ячейки 4x4мм с шагом 8мм (рисунок 13 – ИМ3).
4. Прямоугольные ячейки 8x4мм с шагом по горизонтали 8мм, по вертикали 12мм (рисунок 13 – ИМ4).
5. Треугольные ячейки в квадрате 20x20мм (рисунок 13 – ИМ5).
6. Треугольные ячейки в квадрате 17x17мм (рисунок 13 – ИМ6).

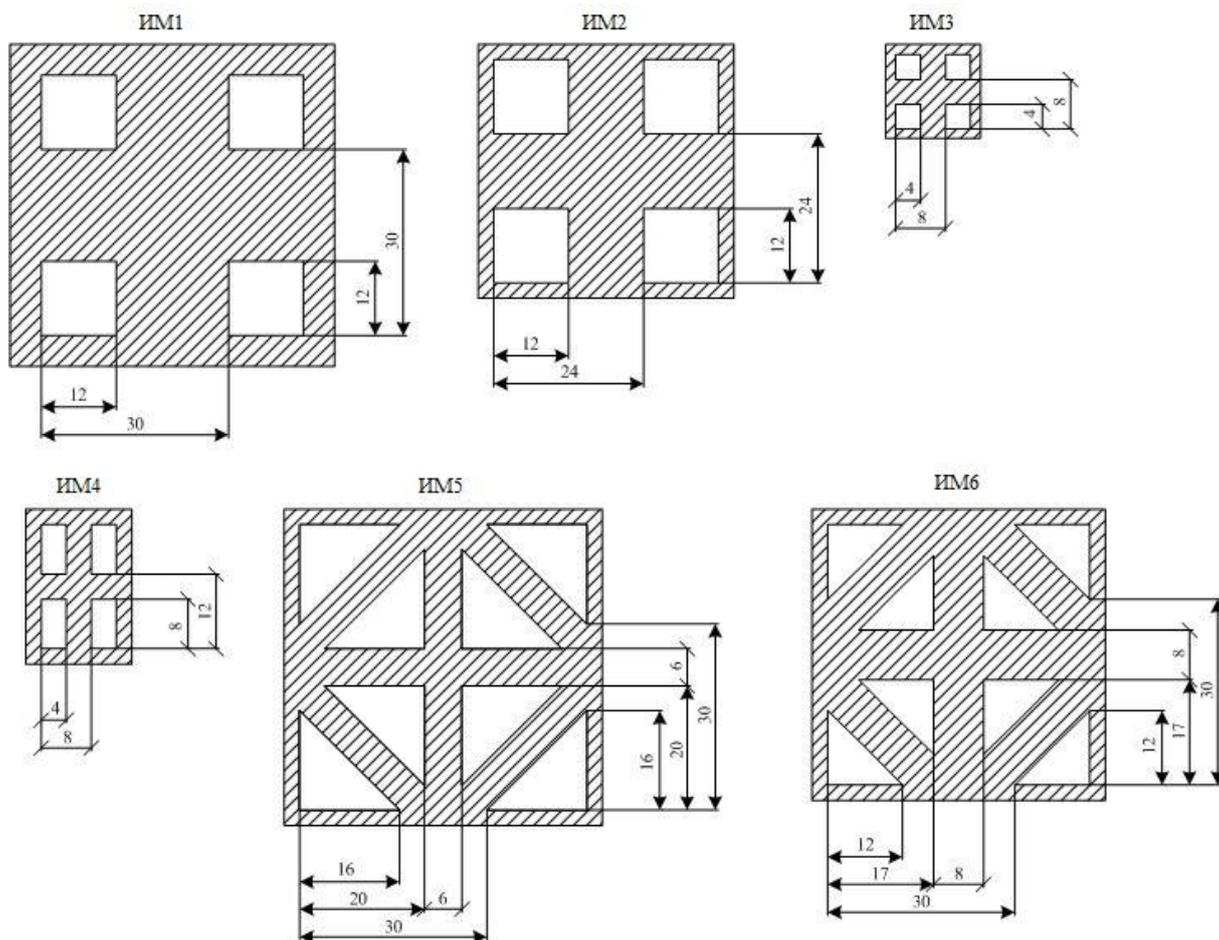


Рис. 13. Исследуемые структуры инерционных масс

### Описание экспериментов

Согласно приведенному выше технологическому процессу, было проведено четыре серии экспериментов. В зависимости от получаемых результатов варьировалось время анизотропного и изотропного травления по пунктам 9 и 10 технологического процесса. Задачей ставилось получить полностью высвобожденный образец инерционной структуры. Время травления по каждому эксперименту приведено в таблице 1.

Таблица 1. Параметры экспериментов

|                | Время<br>анизотропного<br>травления Si, мин | Время<br>изотропного<br>травления Si, мин |
|----------------|---|---|
| Эксперимент №1 | 5   | 10  |
| Эксперимент №2 | -   | 12  |
| Эксперимент №3 | -   | 14  |
| Эксперимент №4 | 3   | 12  |

Самым удачным оказался эксперимент №3. Из всех инерционных масс окончательно высвободилась только ИМ4 (рис. 14), практически высвободилась ИМ3. У этих типов инерционных масс наименьший шаг и размер ячеек.

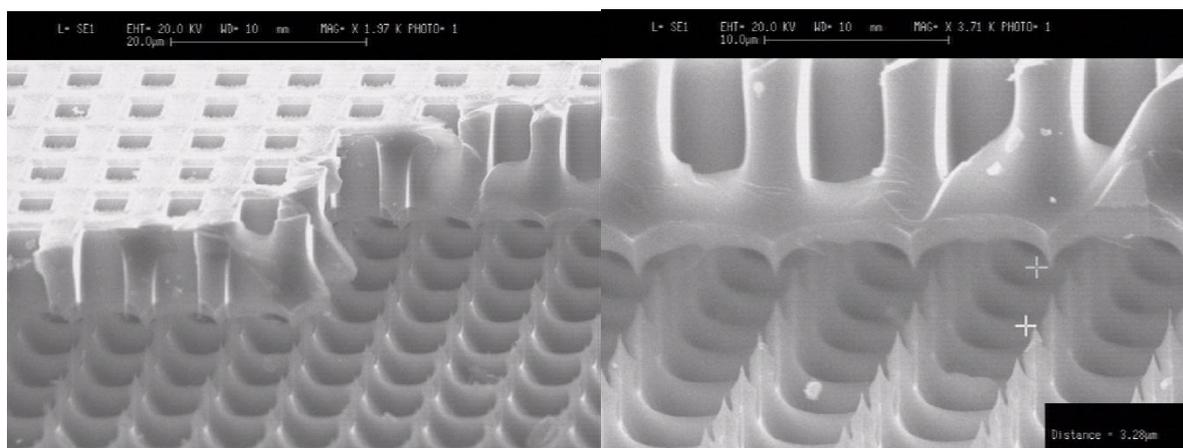


Рис. 14. Высвобожденная инерционная масса типа ИМ4

Инерционные массы типов ИМ1, ИМ2 не высвободились совсем. Теоретически их можно вывесить при гораздо большем времени травления, но при этом, из-за изотропности травления, значительная часть инерционной массы будет стравлена, что скажется на чувствительности прибора.

Инерционные массы с треугольной структурой (ИМ5, ИМ6) так же не высвободились. Характер травления таких структур наглядно виден на рис. 15. Как можно заметить, травление в острых углах идет очень медленно. Получается, что реальный размер травимой ячейки очень мал. Даже если увеличить размер самого треугольника, получим разницу в скоростях травления, что приведет к большому перетраву инерционной массы.

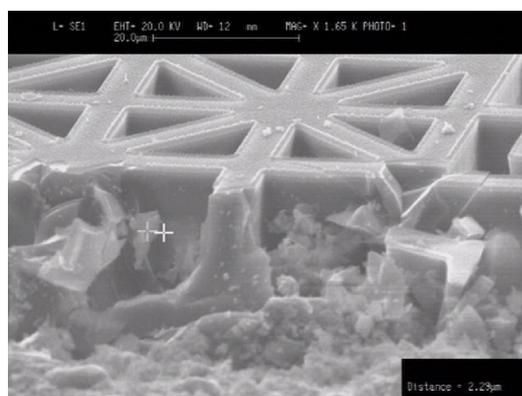


Рис. 15. Инерционная масса типа ИМ5 после травления

Таким образом, инерционные массы структур ИМ1, ИМ2, ИМ5, ИМ6 можно считать неудачными вариантами.

### Заключение

Обобщая результаты всех четырех экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1) Наиболее удачным вариантом структуры инерционной массы является структура из квадратных или прямоугольных ячеек с малым размером и шагом. Оптимальной является структура из ячеек 4x8 мкм, с шагом 8 мкм. Для её высвобождения требуется не менее 14 минут травления методом изотропного реактивно-ионного травления.

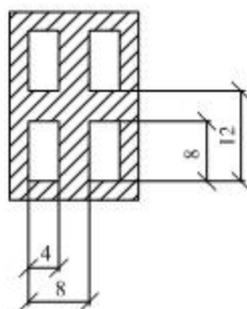


Рис. 16. Оптимальная структура инерционной массы

2) Из аналогичных квадратных ( $A \times A$ ) и прямоугольных ( $A \times 2A$ ) структур быстрее травится прямоугольная структура. Это можно объяснить большим размером ячейки, что облегчает доступ травящего газа ко дну ячейки. Теоретически, должна хорошо травиться структура с крупными ячейками и малой шириной решетки, но в этом случае встает вопрос обеспечения нужной величины инерционной массы, т. е. общие габариты инерционной массы увеличиваются.

3) Использование ячеек с острыми углами ведет к неравномерности вытравливания структур.

4) Необходимо оптимизировать толщину оксидного слоя на поверхности пластины. Слой толщиной 0,5 мкм оказался мал для расчетной глубины травления.

### Литература

1. Светлана Сысоева «MEMS–технологии. Простое и доступное решение сложных системных задач», журнал «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес», 7/2009.
2. В. D. PANT, Lokesh DHAKAR, P. J. GEORGE, S. AHMAD «Design of a MEMS Capacitive Comb-drive Micro-accelerometer with Sag Optimization», Sensors & Transducers Journal, Vol. 109, Issue 10, October 2009, pp. 92-107.