

*В. Е. Пауткин, С. В. Прилуцкая*

## ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СТОП-ТРАВЛЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*V. E. Pautkin, S. V. Prilutskaya*

## GEOMETRICAL STOP-ETCHING IN MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS TECHNOLOGY

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Рассмотрены технологические особенности формирования кремниевых структур микромеханических датчиков методом анизотропного «стоп-травления» кремния. Целью работы является анализ основных возможностей получения структур методами анизотропного травления, основанными на «самоостановке» процесса травления. **Материалы и методы.** Используются положения кристаллографии, основанные на различии скоростей травления кремния по разным кристаллографическим направлениям. **Результаты.** Показана возможность формирования кремниевых структур с X-образным сечением только методом анизотропного травления. **Выводы.** Использование предложенного метода позволяет повысить технологичность изготовления микромеханических датчиков.

**A b s t r a c t. Background.** Technological features of the formation of silicon structures of micromechanical sensors by the method of anisotropic «stop-etching» of silicon are considered. The aim of the paper is to analyze the basic possibilities of obtaining structures by anisotropic etching methods based on the «self-stopping» of the etching process. **Materials and methods.** The crystallographic positions are used, based on the difference in the etching rates of silicon in different crystallographic directions. **Results.** The possibility of forming silicon structures with an X-shaped cross-section is shown only by the method of anisotropic etching. **Conclusions.** The use of the proposed method makes it possible to increase the manufacturability of manufacturing micromechanical sensors.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** анизотропное травление, микроэлектромеханические системы, V-канавки, кристаллографическая плоскость, стоп-травление, защитный слой.

**Key words:** anisotropic etching, microelectromechanical systems, V-grooves, crystallographic plane, stop-etching, protective layer.

В настоящее время технологии микроэлектромеханических систем, или МЭМС, находят широкое применение при разработке датчиков физических величин, таких как датчики давления, акселерометры, датчики угловой скорости. Кремниевая микромеханика позволяет вывести датчиково-преобразующую аппаратуру на новый уровень за счет снижения габаритно-массовых показателей и энергопотребления с сохранением заданных функций. Данное обстоятельство особенно актуально при разработке ДПА для критических применений, таких как системы инерциальной навигации, системы ориентации объекта в пространстве [1, 2].

Кремниевая микромеханика, используя хорошо отработанные в производстве технологии интегральных микросхем, такие как окисление кремниевых пластин, осаждение и травление тонких пленок и другое, в то же время базируется на специально разработанных технологических процессах объемной микрообработки кремния, в частности технологии глубинного

анизотропного травления. Преимущества анизотропного травления при формировании МЭМС заключаются в возможности формирования кремниевых структур строго заданной конфигурации, в том числе с вертикальными стенками, используя в качестве защитной пленки при травлении слой термически выращенного оксида кремния на поверхности пластин. Другим преимуществом технологии является доступность метода, не требующего сложного технологического оборудования и применяемых химических реактивов.

Анизотропное травление позволяет формировать в кремниевых пластинах сквозные отверстия, получать вертикальный профиль структур, создавать упругие подвесы и мембраны датчиков заданной толщины. Наряду с этим метод анизотропного травления позволяет изготавливать структуры, формирование которых из-за кристаллографического строения кремния будет «самоостанавливающимся» процессом.

В технологиях МЭМС широко применяют два типа «самоостанавливающихся», или «самотормозящихся», процесса анизотропного травления кремния.

К первому типу относятся технологии остановки травления на слоях кремния, отличных по своим электрофизическим параметрам от основной кремниевой подложки, например, остановка травления на  $p^{++}$  – слоях, сформированных методом диффузии примеси. Основную массу подложки удаляют травлением в растворе гидроксида калия КОН с последующим дотравливанием в растворе этилендиамина [3, 4].

Разновидностью данной технологии является технология электрохимического стоп-травления. Данная технология основана на процессах анодной пассивации при травлении кремния с обратным смещенным  $p$ - $n$ -переходом, при этом остановка травления кремния достигается при подаче положительного потенциала на тонкий эпитаксиальный слой кремния  $n$ -типа посредством омического электрического контакта, в то время как электрический контакт к травящей подложке кремния  $p$ -типа осуществляется через травильный раствор с инертным электродом [5].

Ко второму типу «самотормозящихся» процессов относят анизотропное травление, останавливающееся из-за особенностей кристаллографического строения кремния и совокупности таких технологических факторов, как кристаллографическая ориентация кремниевой подложки, кристаллографическая ориентация маски травления, ширина маски травления, а также тип используемого травителя.

Известно, что при ориентации кремниевой пластины (100) и ориентации стороны маски травления вдоль кристаллографических направлений [110] при травлении в водном растворе КОН профиль травления будет иметь вид, изображенный на рис. 1.

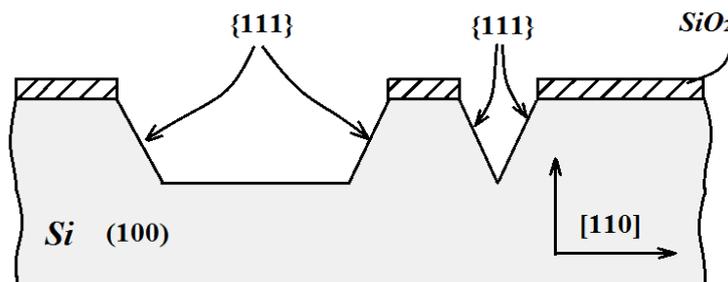


Рис. 1. Профиль травления кремниевой пластины

Как видно из рис. 1, при смыкании кристаллографических плоскостей (111) травление останавливается (на самом деле плоскости (111) также продолжают травиться в горизонтальном направлении, но скорость их травления в сотни раз меньше скоростей травления плоскостей (100) и (110), поэтому этим обстоятельством на практике пренебрегают). Таким образом, варьируя шириной маски травления, можно получать точно заданный профиль травления, вплоть до самоостановки процесса при смыкании плоскостей (111). В литературных источниках это получило название «геометрическое стоп-травление» [6, 7].

Аналогом данного процесса в технологии интегральных микросхем можно считать технологию «полипланар» – вертикальное анизотропное травление с заполнением канавок поликристаллическим кремнием [8].

Технологии геометрического стоп-травления могут быть применены при создании различных структур МЭМС-датчиков, таких как конструктивные элементы датчиков давления [9] или упругие элементы МЭМС-акселерометров [10].

В обоих случаях анизотропно травят кремний до получения  $V$ -канавки и либо прекращают процесс формирования элементов [9], либо формирование  $V$ -канавки является промежуточным этапом формирования необходимых структур [10].

На технологии «геометрического стоп-травления» основано формирование кремниевых структур, аналогичных изображенным на рис. 2. Данные структуры могут быть реализованы в конструкциях кремниевых чувствительных элементов микромеханических датчиков угловой скорости.

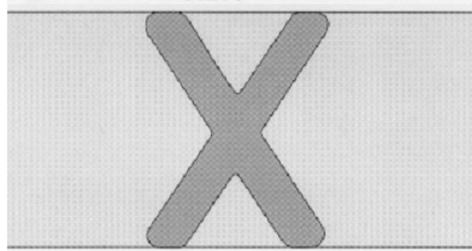


Рис. 2. Торсион микромеханического датчика угловой скорости

Представленная структура может быть выполнена последовательным применением различных видов травления, например плазмохимического и анизотропного. При плазмохимическом травлении протравливаются вертикальные стенки (канавки) микромеханической структуры, при анизотропном травлении формируются крестообразные сечения в соответствии с ориентацией кристаллографических плоскостей монокристаллической пластины кремния [11].

Представленный выше способ изготовления характеризуется необходимостью применения сложного технологического оборудования, такого, как установок плазмохимического травления кремния с возможностью создания вертикального профиля травления. Кроме того, после операций плазмохимического травления на поверхности пластин остаются значительные загрязнения, что требует тщательной очистки кремниевых пластин [12]. Это ограничивает технологичность способа.

В целях сокращения номенклатуры используемого технологического оборудования разработан способ изготовления указанных структур крестообразного сечения [13]. Данный способ включает формирование механической структуры с крестообразными торсионами из пластины монокристаллического кремния только методом анизотропного травления, которое проводят в два этапа. На первом этапе формируют промежуточную фигуру торсиона в форме выпуклого шестиугольника травлением кремния в плоскости  $\{110\}$  с предварительным формированием первого защитного слоя с двух сторон пластины с фотолитографическим рисунком, симметричным с двух сторон пластины. Формируют второй защитный слой с двух сторон пластины с фотолитографическим рисунком, также симметричным с двух сторон пластины. Вторым анизотропным травлением формируют крестообразную форму торсиона путем травления кремния в плоскостях  $\{110\}$  и  $\{100\}$  до плоскостей  $\{111\}$  (рис. 3).

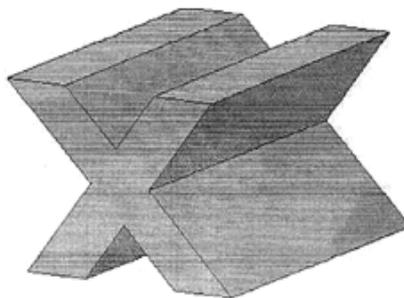


Рис. 3. Внешний вид микромеханической структуры

Укрупненный маршрут изготовления можно описать следующим образом. Исходную пластину кремния ориентации (100) подвергают термическому окислению до получения толщины окисной пленки, необходимой для защиты структур при глубинном анизотропном травлении.

Далее методом фотолитографии формируют рисунок первого защитного слоя крестообразного торсиона  $X$ -образного сечения на обеих сторонах кремниевой пластины, травят окисел кремния на открытых участках окисла, проводят химическую обработку кремниевых пластин и повторно окисляют кремниевую пластину.

Затем методом фотолитографии формируют рисунок второго защитного слоя торсиона на обеих сторонах кремниевой пластины, травят окисел кремния на открытых участках кремниевой пластины, проводят химическую обработку кремниевых пластин.

После формирования первого и второго защитного слоев торсиона проводят операцию анизотропного травления кремния до получения промежуточной фигуры травления. Анизотропное травление проводят в растворе гидроксида калия КОН, поддерживая температуру травителя в пределах 96–98 °С. Известны характеристики анизотропного травления кремния ориентации (100): скорости травления плоскостей {100}, {110}, {111}, а также слоев термического оксида кремния.

Следующей операцией является травление второго защитного слоя кремния в буферном травителе в областях формирования  $V$ -области торсиона с планарной и непланарной стороны кремниевой пластины, при этом из-за разной толщины первого и второго защитного слоя окисла на плечах торсиона остается слой окисла толщиной  $h_{\text{SiO}_2}$ , необходимый для формирования конечной фигуры торсиона. Далее проводят травление промежуточной фигуры. При этом при анизотропном травлении кремния в  $V$ -области торсиона с планарной и непланарной сторон пластины происходит самоограничение травления на плоскостях {111}, что приводит к остановке травления. В результате предложенного решения происходит формирование крестообразного торсиона исключительно методом анизотропного травления кремния (рис. 4).

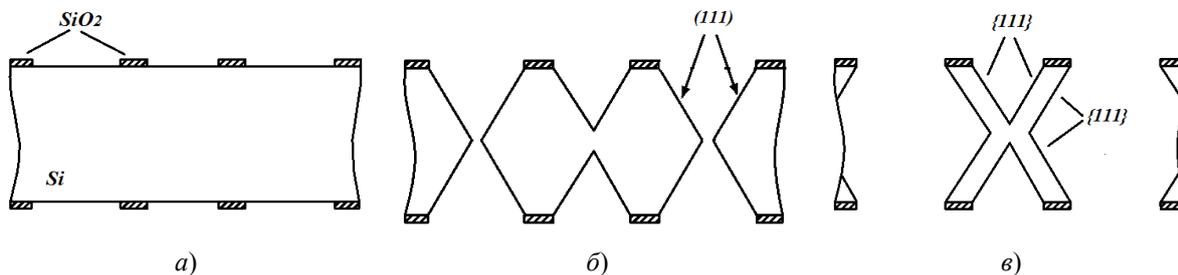


Рис. 4. Схема процесса травления: а – исходная кремниевая пластина; б – промежуточная фигура травления; в – окончательная фигура травления

Предложенный способ обеспечивает изготовление микромеханических  $X$ -структур только методом анизотропного травления, что сокращает номенклатуру используемого технологического оборудования, сокращает производственный цикл изготовления и делает способ более технологичным по сравнению с известными.

### Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики / А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирянина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 45–53.
2. Распопов, В. Я. Система ориентации на микромеханических акселерометрах / В. Я. Распопов, Д. М. Малютин, Ю. В. Иванов, Д. Г. Грязин // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 9. – С. 52–56.
3. Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств : справочник / З. Ю. Готра. – М. : Радио и связь, 1991. – 528 с.
4. Пат. № 2284613 Российская Федерация, МПК H01L29/84, G01L9/04. Полупроводниковый преобразователь давления и способ его изготовления / Баринов И. Н., Козин С. А. ; опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27.

5. Иващенко, Е. И. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики / Е. И. Иващенко, Ю. Б. Цветков // Микросистемная техника. – 2000. – № 2. – С. 16–20.
6. Kenneth, E. Bean. Anisotropic Etching of Silicon / E. Bean. Kenneth // IEEE Transactions On Electron Devices. – 1978. – Vol. Ed-25, № 10. – P.1185–1193.
7. Fabrication of a vertical side wall using double-sided anisotropic etching of (100) oriented silicon / Hyun-Seok Kim, Jung-Mu Kim, Yong-Seung Bang, Eun-Seok Song, Chang-Hyeon Jiand, Yong-Kweon Kim // J. Micromech. Microeng. – 2012. – Vol. 22. – 11 p. DOI: 10.1088/0960-1317/22/9/095014.
8. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок : учебник для вузов / Л. А. Коледов. – М. : Радио и связь, 1989. – 400 с.
9. Чернов, А. С. Исследование закономерностей формирования 3D островковых структур Si (100) при травлении в водном растворе КОН / А. С. Чернов, М. А. Чебанов, В. А. Гридчин, В. Ю. Васильев // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 9. – С. 34–40.
10. Былинкин, С. Ф. Интегральные МЭМС-датчики с повышенной стабильностью выходных параметров / С. Ф. Былинкин, А. А. Гаврилов, А. Н. Шипунов // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 8. – С. 36–41.
11. Пат. № 2 248 525 Российская Федерация, G01C 19/56 G01P 9/04. Микромеханический вибрационный гироскоп и способ его изготовления / Рубчиц В. Г., Калугин В. В., Лапенко В. Н., Шилов В. Ф., Плеханов В. Е., Тихонов В. А., Зотов С. А., Тимошенков С. П., Максимов В. Н. ; опублик. 20.03.2005; Бюл. № 8.
12. Галперин, В. А. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях / В. А. Галперин, Е. В. Данилкин, А. И. Мочалов. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 283 с.
13. Пат. № 2 485 620 Российская Федерация, МПК H01L21/302, G01C 19/22. Способ изготовления микромеханического вибрационного гироскопа / Пауткин В. Е., Мишанин А. Е., Шепталина С. В., Николаев А. А. ; опублик. 20.06.2013; Бюл. № 17.

**Пауткин Валерий Евгеньевич**

кандидат технических наук,  
главный специалист,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: inercial@niifi.ru

**Pautkin Valeriy Evgen'evich**

candidate of technical sciences, chief specialist,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Прилуцкая Светлана Владиславовна**

инженер-конструктор,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: inercial@niifi.ru

**Prilutskaya Svetlana Vladislavovna**

design engineer,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.2.084

**Пауткин, В. Е.**

**Геометрическое стоп-травление в технологии микроэлектромеханических систем** / В. Е. Пауткин, С. В. Прилуцкая // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 50–54. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-7.