

## Оптимизация технологии изготовления упругого подвеса чувствительного элемента компенсационного маятникового акселерометра

К. Д. Шестакова, *shestakova.kd@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В работе рассмотрен кремниевый чувствительный элемент компенсационного маятникового акселерометра с балочным упругим подвесом, применяемого в ракетно-космической технике в системах навигации и стабилизации. Основной целью работы являлось увеличение выхода годных изделий, изготавливаемых по традиционной технологии за счет возможности бездефектного формирования упругого подвеса с низкой погрешностью по толщине. Рассмотрен классический способ получения упругого подвеса с помощью формирования  $p$ - $n$ -перехода методом ионной имплантации, предварительного жидкостного глубинного травления и финишного электрохимического жидкостного стоп-травления в растворе КОН. Изделия, изготовленные по данной технологии, содержали ряд дефектов, что приводило к высокому проценту брака. Была предложена оптимизация технологии, которая позволила значительно упростить технологический процесс, при этом сохранив точностные параметры получаемых элементов, для чего были объединены этапы предварительного и финишного травлений. Данные меры были внедрены в серийный групповой технологический процесс и показали свою эффективность: выход годных, в сравнении с предыдущей технологией, вырос на 23 %, при этом трудоемкость изготовления снизилась на 5 %, а погрешность изготовления упругого подвеса по толщине не превысила  $\pm 0,5$  мкм.

**Ключевые слова:** акселерометр, кремний, технология, упругий подвес, чувствительный элемент, электрохимическое травление, мембрана

## Optimizing Manufacturing Technology for Elastic Suspension of Sensitive Elements in Compensating Pendulum Accelerometers

K. D. Shestakova, *shestakova.kd@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** This paper explores the use of a beam elastic suspension silicon sensitive element in a compensatory pendulum accelerometer for rocket and space technology in navigation and stabilization systems. The main objective is to increase the yield of suitable products manufactured by traditional technology by achieving defect-free formation of an elastic suspension with low thickness error. The classical method of obtaining an elastic suspension involves forming a  $p$ - $n$  junction by ion implantation, followed by preliminary liquid deep etching and finishing electrochemical liquid stop-etching in a KOH solution. However, this method often results in a high percentage of defects, reducing the yield of suitable products. To address this issue, the author proposed a modified technology that significantly simplifies the manufacturing process while maintaining accuracy parameters by combining the stages of preliminary and final etching. These modifications were introduced into a serial group technological process and proved to be effective, increasing the yield of suitable products by 23% compared to the previous technology while decreasing the labor intensity of manufacturing by 5%. The manufacturing error of the elastic suspension in thickness did not exceed  $\pm 0.5$   $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** accelerometer, silicon, technology, elastic suspension, sensitive element, electrochemical etching, membrane.

## Введение

Акселерометры, чувствительные элементы которых сформированы из материала кремния, получили широкое распространение благодаря низкой себестоимости, что обусловлено возможностью применения стандартных групповых технологических процессов микрообработки кремниевых заготовок и высокой степенью повторяемости изделий. Ключевым преимуществом кремния является применения жидкостного травления с анизотропией в зависимости от индексов Миллера кристаллической решетки, что позволяет сформировать необходимые профили травления, недостижимые другими методами. Благодаря этой особенности возможно формирование жидкостным химическим травлением балочных упругих подвесов. Однако известно, что традиционные методы жидкостного химического травления кремниевых пластин диаметром от 100 мм [1–3] обладают неоднородностью формирования объемных микроструктур, что при больших глубинах травления приводит к значительным отклонениям размеров. Известен традиционный метод, основанный на применении электрохимического травления, обеспечивающий получение балочных упругих подвесов с высокой точностью по толщине и повторяемостью по пластине [4, 5]. Целью данной работы являлась оптимизация технологии изготовления упругого подвеса с погрешностью формирования  $\pm 0,5$  мкм по толщине для увеличения выхода годных конечных изделий.

Задачами работы было решение следующих вопросов.

1. Определение технологических операций, привносящих наибольшее количество дефектов на изделиях.

2. Поиск решений по выявленным операциям.

3. Применение найденных решений на практике, а также анализ трудоемкости изготовления упругих подвесов и выхода годных изделий.

## Описание конструкции

Один из наиболее распространенных вариантов компенсационного акселерометра с кремниевым чувствительным элементом с балочным упругим подвесом представлен на рис. 1. Балочный подвес

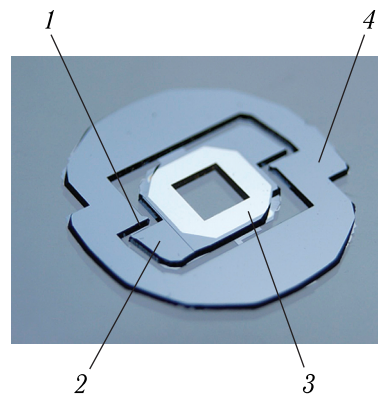


Рис. 1. Изображение чувствительного элемента компенсационного кремниевых акселерометра с балочным подвесом: 1 — балочные упругие подвесы; 2 — неподвижная часть маятникового узла; 3 — платик; 4 — подвижная часть маятникового узла

чувствительного элемента акселерометра представляет собой плоскую упругую перемычку, закрепленную с двух противоположных сторон. Чувствительный элемент закреплен центральной неподвижной частью (2) в корпусе, которая балочными упругими подвесами (1) связана с внешней подвижной частью (4). На верхней и нижней сторонах чувствительного элемента сформированы платики (3) для формирования зазора между чувствительным элементом и статичными пластинами в акселерометре. Угол отклонения подвижной части (4) в результате внешнего возмущающего воздействия на акселерометр регистрируется с помощью значений емкостей, образуемых общей обкладкой, являющейся собственно кремниевым чувствительным элементом, и двумя статичными обкладками, расположенными внутри корпуса прибора. Рассмотренный акселерометр при современном уровне развития технологии позволяет достичь характеристик на уровне  $0,5 \mu\text{g}$  порога чувствительность в диапазоне  $\pm 35 \text{ g}$  при дрейфе нулевого сигнала, не превышающем  $20 \mu\text{g}$  [6].

## Технология изготовления

Первоначально разработанная технология изготовления упругого подвеса чувствительного элемента акселерометра являлась довольно трудоемкой. Последовательность технологических операций представлена на рис. 2.

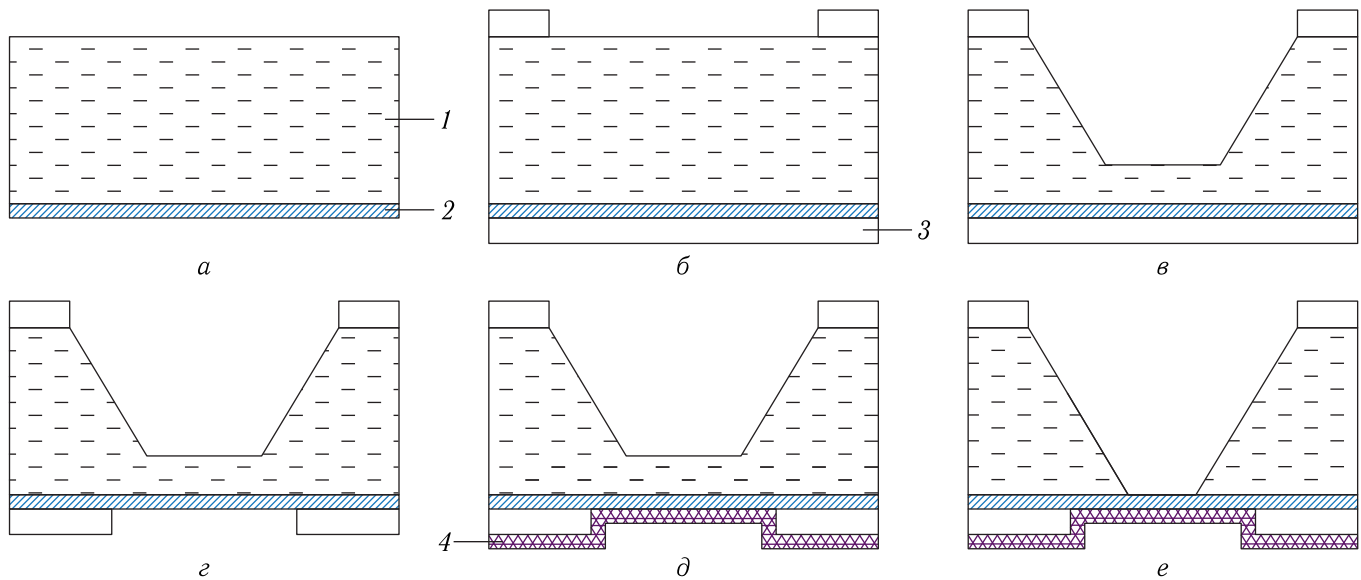


Рис. 2. Последовательность технологических операций изготовления упругого балочного подвеса по традиционной технологии (а, б, в, г, д, е): 1 — кремниевая пластина; 2 — легированная область; 3 — двухслойная маска; 4 — слой металлизации

Для изготовления используются кремниевые заготовки (1), легированные акцепторной примесью двусторонней полировкой, толщиной 385 мкм. На первом этапе методом ионной имплантации и отжига имплантируемой донорной примеси формируется несимметричный  $p-n$ -переход (2) на глубине, равной толщине будущего упругого балочного чувствительного элемента. Далее (рис. 2, б) формируется двухслойная маска (3) с лицевой стороны заготовки. После проводится глубинное анизотропное жидкостное химическое травление кремния (рис. 2, в) под маской в концентрированном горячем растворе КОН на глубину более 200 мкм в оснастке, защищающей обратную сторону от травления. Для формирования микроструктур процесс ЖХТ является классическим, но при травлении глубиной около 330 мкм погрешность толщины формируемой мембраны по пластине диаметром 100 мм составляет около 3 мкм. Использование электрохимического стоп-травления позволяет снизить погрешность формирования мембраны до  $\pm 0,5$  мкм по всей пластине любого диаметра. Поэтому оставшаяся толщина кремниевой мембраны дотравливается методом электрохимического стоп-травления в таком же растворе с подачей к легированной части пластины электрического потенциала. Для обеспечения контакта к  $p-n$ -переходу на обратной сто-

роне пластины делается маска, соответствующая рисунку сквозного травления кремния для реализации упругого подвеса из сформированной мембраны: методом магнетронного напыления наносится слой металла (рис. 2, г, д). Далее проводится процесс жидкостного электрохимического стоп-травления (рис. 2, е). Пластину с подключенным к металлическому слою (4) ( $p-n$ -переходу (2)) электродом опускают в концентрированный раствор КОН и подают потенциал. По увеличению регистрируемых значений силы тока судят о завершении процесса травления, который останавливается при достижении легированной области из-за пассивации кремния [5]. Далее металл (4) стравливают и плазмохимическим травлением проводят сквозное вскрытие кремния по маске, сформированной с обратной стороны, в результате оказываются сформированы упругие переключки.

В процессе электрохимического травления к легированной части пластины требуется подавать электрический потенциал. Для этого с обратной стороны пластины удаляются области маскирующего слоя, соответствующие рисунку сквозного травления кремния для формирования упругого подвеса из сформированной мембраны. Последующее напыление металла (4) на обратную сторону пластины позволяет осуществить омический

контакт к легированной области донорной примесью (1), однако одновременно с этим создает ряд технологических трудностей. Попадание раствора КОН, на обратную сторону пластины ведет к растравливанию металла (4), нестойкого в КОН, и травлению легированной части (2) чувствительного элемента с обратной стороны. А это, в свою очередь, является неустранимым дефектом образцов на пластине. На 20% пластин из партии возникали протравы глубиной от 10 до 100 мкм. Для реализации представленной технологии была использована оснастка для электрохимического травления, в которой пластина контактирует с травителем только стороной, на которой необходимо сформировать рельеф, а обратная сторона пластины герметично зафиксирована в оснастке [7]. Также эта оснастка используется для подачи электрического потенциала к пластине. Благодаря данной оснастке удалось полностью избавиться от возникающих дефектов в виде протрав на обратной стороне пластины, что повысило выход годных на 20%.

В настоящее время оптимизированная технология изготовления упругого подвеса имеет вид, изображенный на рис. 3.

На первом этапе (рис. 3, а), а также в кремниевой заготовке (1), формируется несимметричный  $p-n$ -переход (2). Далее формируется двухслойная маска (3), но уже не с одной стороны, а с двух (рис. 3, б), что экономит ресурсы, так как отсутствует необходимость в двукратном формировании фоторезистивной маски. Со стороны пластины, на которой находится  $p-n$ -переход (2), напыляется слой металла (4) (рис. 3, в). Далее в растворе КОН пластина травится до требуемой толщины мембраны с помощью процесса электрохимического стоптравления (рис. 3, г). В заключение по сформированному с обратной стороны рисунку маскирующего слоя плазмохимическим травлением проводится сквозное травление пластины, в результате чего проявляются упругие подвесы.

Несмотря на то что время проведения процесса электрохимического травления увеличилось, благодаря сокращению количества операций, в том числе объединению операций формирования маски с двух сторон пластины, трудоемкость изготовления чувствительного элемента снизилась не менее чем на 5%. Также за счет снижения количества операций, на которых может возникнуть потенциальный брак, выход годных повысился дополнительно

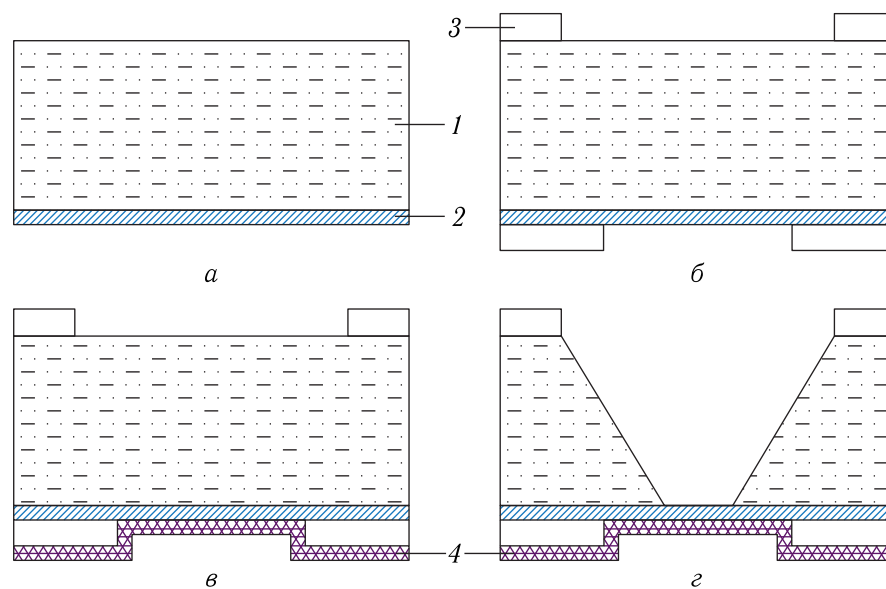


Рис. 3. Оптимизированная технология изготовления упругого подвеса чувствительного элемента: а — формирование легированной области; б — формирование двухслойной защитной маски; в — формирование слоя металлизации; г — формирование мембраны. 1 — Кремниевая пластина; 2 — легированная область; 3 — двухслойная маска; 4 — слой металлизации

на 3%. Оценка выхода годных изделий и трудоемкости изготовления проводилась в условиях мелкосерийного производства методами статистического анализа, проанализировано до 40 партий изделий по 9 пластин в каждой партии.

## Заключение

Таким образом, в работе на основе метода электрохимического травления был разработан оптимизированный вариант технологии изготовления балочных упругих подвесов кремниевых чувствительных элементов компенсационных акселерометров. Данное решение позволило увеличить выход годных на 23%, снизив трудоемкость изготовления на 5%, при этом погрешность изготовления упругого подвеса по толщине не превысила  $\pm 0,5$  мкм.

## Список литературы

1. *Ветрова Е. В., Смирнов И. П., Козлов Д. В., Запелляев В. М.* Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, № 2. С. 95–102.
2. Патент № 2207658 Российской Федерации. Способ изготовления микромеханического инерциального чувствительного элемента емкостного типа: № 2001119005/28: заявл. 09.07.2001: опубл. 27.06.2003 / Мокров Е. А., Зеленцов Ю. А., Козин С. А., Акимов И. Г., Федулов А. В., Чистякова Т. Г., Ануфриев Ю. С. Бюл. № 12. 11 с.
3. *Hyun-Seok Kim, Jung-Mu Kim, Yong-Seung Bang, Eun-Seok Song, Chang-Hyeon Jiand, Yong-Kweon Kim.* Fabrication of a vertical side wall using double-sided anisotropic etching of (100) oriented silicon // *J. Microtech. Microeng.*, 2012, vol. 22. 11 p.
4. *Иващенко Е. И., Цветков Ю. Б.* Экспериментальное исследование электрохимической остановки анизотропного травления кремния. Материалы V Международ. научно-технической конф. «Высокие технологии в промышленности России». М., 1999. С. 72–76.
5. *Иващенко Е. И., Цветков Ю. Б.* Формирование чувствительного элемента полупроводникового датчика методом анизотропного травления с электрохимической самоостановкой процесса. Тезисы докладов IX Международ. научно-технической конф. «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления». Гурзуф, 1998. С. 21.
6. *Будкин В. Л., Паршин В. А., Прозоров С. В., Саломатин А. К., Соловьев В. М.* Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации // *Микросистемная техника*, 2000, № 2. С. 31–34.
7. Патент № 2794560 Российской Федерации. Способ формирования объемных элементов в кремнии для устройств микросистемной техники и производственная линия для осуществления способа: № 2022122545: заявл. 19.08.2022: опубл. 21.04.2023 / Смирнов И. П., Козлов Д. В., Харламов М. С., Шестакова К. Д., Корпухин А. С. Бюл. № 12. 18 с.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 22.03.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 26.05.2023