



УДК 621.382

ББК 34.96

ГРНТИ 47.13.11

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.480.483

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА

FEATURES OF DESIGNING AND MANUFACTURING A MICROACCELEROMETER SENSING DEVICE

ТИМОШЕНКОВ СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ*Д.т.н., профессор;**spt@miee.ru, sptIII@mail.ru***КАЛУГИН ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ***Д.т.н., профессор**viktorII8@mail.ru***АНЧУТИН СТЕПАН АЛЕКСАНДРОВИЧ***Ведущий инженер**step305@mail.ru***ЗАРЯНКИН НИКОЛАЙ МИХАЙЛОВИЧ***К.т.н., ведущий инженер**n.zaryankin@mail.ru***КОЧУРИНА ЕЛЕНА СЕРГЕЕВНА***К.т.н., инженер-конструктор**kochurinaes@gmail.com*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»
124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1*

В статье рассматривается разработанная конструкция чувствительного элемента микроакселерометра. Приведены результаты модального и статического анализа, проведенные методом конечно-элементного анализа. Предложен режим травления глубоких канавок в кремнии с использованием Bosch-процесса. Предложены фотографии изготовленных чувствительных элементов.

Ключевые слова: микроакселерометр; чувствительный элемент; модальный анализ; статический анализ; Bosch-процесс.

The paper highlights the developed microaccelerometer sensing device design, as well as the results of modal and static analysis carried out using the method of terminating ultimate analysis. The mode of etching deep flutes in silicon using Bosch-process has been proposed. Photos of the sensing devices made are given.

Keywords: microaccelerometer; sensing device; the modal analysis; the static analysis; Bosch-process.

Микроустройства, заменяя существующие, привносят новое качество в привычные вещи. Предполагается, что технология изготовления микроустройств даст мощный толчок технологическому развитию и сформирует условия для появления новой волны технологических инноваций. С технологией микроэлектроники связано исключительно успешное развитие электроники, когда при значительном уменьшении стоимости достигнуто и существенное увеличение функциональных возможностей изделий [1, 2]. В рамках этой технологии создано большое число новых технологических методик, которые можно использовать также в микромеханике и микроэлектромеханике. В данной статье приведены особенности технологии изготовления чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического акселерометра (ММА), а также описаны особенности разработанной конструкции ЧЭ и численные результаты некоторых расчетов.

Разработанная конструкция ЧЭ MMA представляет собой инерциальную массу (1), подвешенную на упругих элементах — торсионах (2) (рис. 1). В конструкции предусмотрена емкостная система съема сигнала, представляющая собой 30 дифференциальных пар электродов (3) (рис. 1). При появление воздействующего ускорения вдоль оси чувствительности (4) масса (1) перемещается, что приводит к изменению величин емкостей (3). По величине изменения емкостей судят о величине воздействующего ускорения.

Для моделирования ЧЭ MMA была использована программная система ANSYS, которая представляет собой набор программных пакетов, предназначенных для решения обширного класса задач методом конечно-элементного моделирования [3, 4]. Для расчетов используют как аналитические, так и численные методы. В основе используемого метода



лежит дискретизация объекта, т. е. построение конечно-элементной сетки, в целях решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в границах каждой элементарной области — конечного элемента. В нашем случае сетка конечных элементов для моделирования ЧЭ состоит из 113 837 элементов и содержит 205 392 узла (рис. 2).

Проведенный модальный анализ позволил выявить собственные частоты: 3539,8 Гц, 7956,9 Гц, 8470,6 Гц. Модальный анализ показал, что рабочая форма колебаний ЧЭ (а значит, и соответствующая степень свободы) является самой мягкой (собственная частота порядка 3,54 кГц). Паразитные формы колебаний имеют более высокие собственные частоты (более 7,9 кГц) и поэтому практически не влияют на суммарную деформацию подвеса ЧЭ, их вклад в движение ЧЭ минимален. Высокие значения собственных частот являются гарантией отсутствия резонансных эффектов при типовых внешних воздействиях (с частотами до 2 кГц).

Проведенный статический анализ показал, что относительное смещение ЧЭ при действии силы тяжести вдоль оси чувствительности составляет 0,06 мкм/г. На рис. 3 приведена эквивалентная схема ЧЭ MMA.

Емкости C_1 и C_2 образуются как сумма индивидуальных емкостей соответствующей гребенчатой структуры. Каждая структура содержит 30 отдельных емкостей. Отдельная емкость гребенки ЧЭ показана на рис. 4.

Для каждой гребенки ЧЭ MMA можно записать:

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \frac{bL}{h_0 + dx} + \epsilon_0 \cdot \frac{bL}{h_0 - dx},$$

$$C_2 = \epsilon_0 \cdot \frac{bL}{h_0 - dx} + \epsilon_0 \cdot \frac{bL}{h_0 + dx}.$$

Здесь $\epsilon_0 = 8,85 \text{ пФ/м}$, $b = 30 \text{ мкм}$ — высота профиля ЧЭ MMA, $L = 252 \text{ мкм}$ — длина рабочей части электродов (зона перекрытия электродов подвижной и неподвижной частей ЧЭ), $h_0 = 3 \text{ мкм}$ — номинальный зазор (при отсутствии ускорения, в положении покоя), $dx = K_M \cdot g_y$ — смещение ЧЭ под действием ускорения силы тяжести, $K_M = 0,08 \text{ мкм/г}$ — крутизна статической характеристики ЧЭ, $g_y = g \cdot \sin\alpha \approx g \cdot \alpha$ — величина проекции ускорения силы тяжести g на ось чувствительности ЧЭ MMA, α — малый угол отклонения оси чувствительности ЧЭ MMA от горизонтальной плоскости.

Тогда можно записать для измерителя дифференциальной емкости:

$$C_1 = \epsilon_0 b L \left(\frac{1}{h_0 + K_M \cdot 1g \cdot \alpha} + \frac{1}{h_1 - K_M \cdot 1g \cdot \alpha} \right),$$

$$C_2 = \epsilon_0 b L \left(\frac{1}{h_0 - K_M \cdot 1g \cdot \alpha} + \frac{1}{h_1 + K_M \cdot 1g \cdot \alpha} \right),$$

$$dC = C_1 - C_2 = \frac{2b\epsilon_0 \cdot 1g \cdot K_M L (h_0^2 - h_1^2)}{(h_0^2 - \alpha^2 (1g \cdot K_M)^2) \cdot (h_1^2 - \alpha^2 (1g \cdot K_M)^2)} \cdot \alpha,$$

$$dC \approx \frac{2b\epsilon_0 \cdot 1g \cdot K_M L (h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2 \cdot h_1^2} \cdot \alpha + \frac{2b\epsilon_0 \cdot (1g \cdot K_M)^3 L (h_0^4 - h_1^4)}{h_0^4 \cdot h_1^4} \cdot \alpha^3.$$

Масштабный коэффициент ЧЭ MMA можно оценить по формуле (для 30 гребенок)

$$K_\alpha = \frac{2 \cdot 30 \cdot b \epsilon_0 \cdot 1g \cdot K_M L \cdot (h_0^2 - h_1^2)}{h_0^2 \cdot h_1^2}.$$

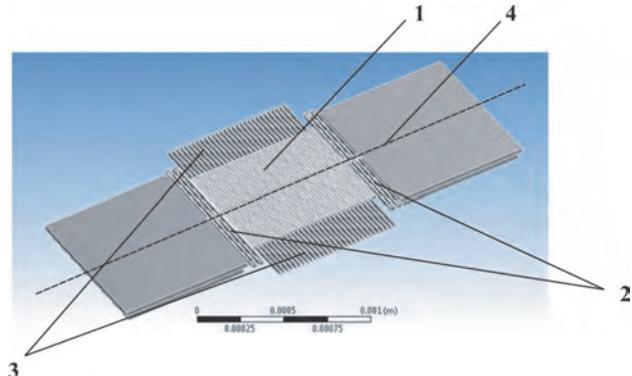


Рис. 1. Геометрическая модель чувствительного элемента микромеханического акселерометра: 1 — инерциальная масса, 2 — торсионы, 3 — электроды системы съема информации, 4 — ось чувствительности

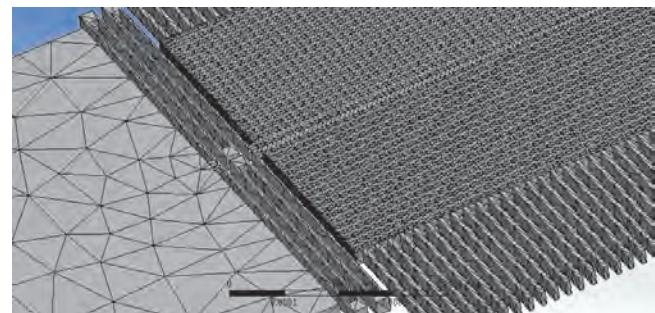


Рис. 2. Конечно-элементная модель (часть) ЧЭ MMA

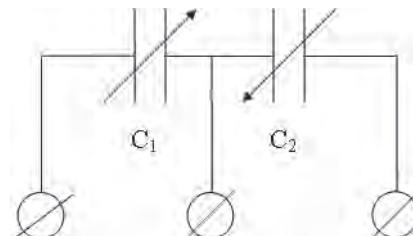


Рис. 3. Эквивалентная схема ЧЭ MMA

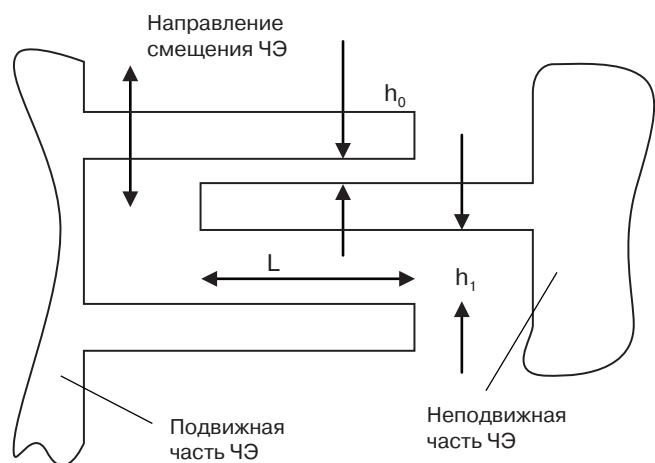


Рис. 4. Схематичное изображение одиночной емкости гребенки ЧЭ MMA

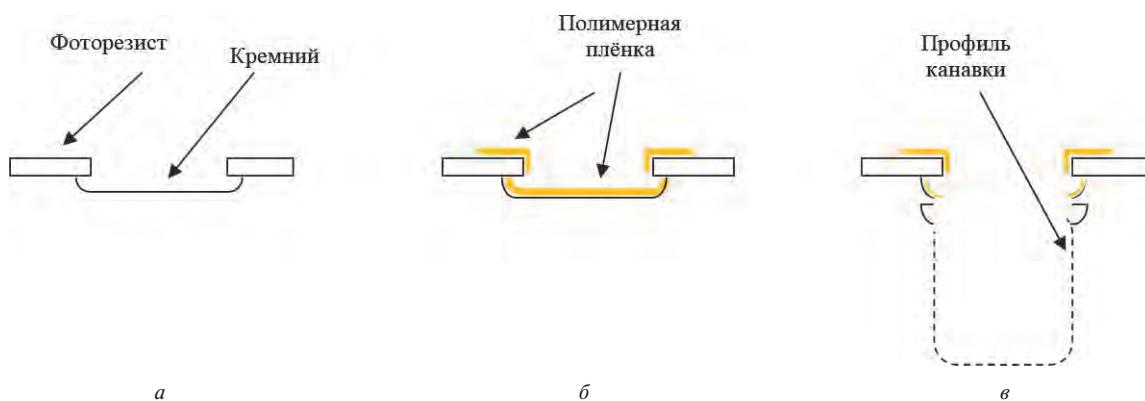


Рис. 5. Иллюстрация Bosch-процесса: а) 1-й цикл (стадия травления); б) 1-й цикл (стадия пассивации); в) 2-й цикл (стадия травления)

Таблица 1. Параметры разработанного режима травления глубоких канавок в кремнии с использованием Bosch-процесса

Наименование параметра	Значение параметра
Расход газа SF ₆	300 см ³ /мин
Расход газа C ₄ F ₈	150 см ³ /мин
Скважность подачи газов	7 с / 2,5 с
Давление газа	3 Па
Мощность ICP-разряда	2000 Вт
Мощность смещения	100 Вт
Температура подложкодержателя	10 °C

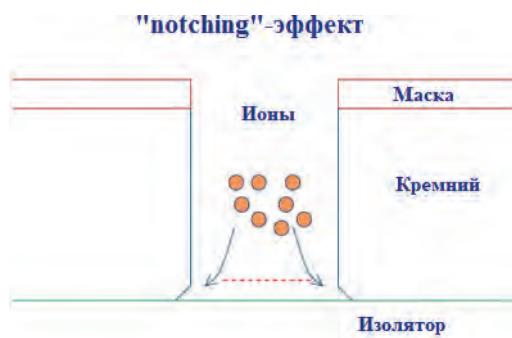


Рис. 6. Принцип возникновения notching-эффекта

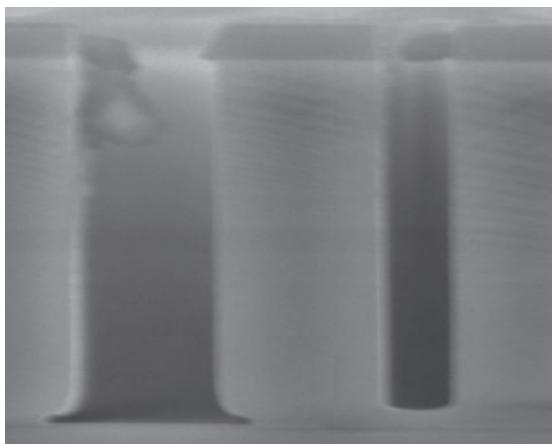


Рис. 7. Пример проявления notching-эффекта

Нелинейность преобразования примет вид

$$N_3 = \frac{K_\alpha \cdot (\lg K_M)^2 \cdot (h_0^2 + h_1^2)}{h_0^2 \cdot h_1^2}; \quad \delta N\% = \frac{N_3 \cdot \alpha_{\max}^2}{K_\alpha} \cdot 100\%.$$

Численно можно оценить параметры статической характеристики преобразования ЧЭ MMA: $K_\alpha = 0,00023 \text{ пФ/}^\circ = 0,013 \text{ пФ/рад}$; $\delta N\% \approx 0,0014\%$.

Технологический процесс изготовления ЧЭ MMA имеет ряд особенностей [5]. Так, для проведения процессов травления канавок в кремнии на глубину до 100 мкм и более с вертикальными стенками был предложен так называемый Bosch-процесс. Его суть состоит в многократном повторении двухстадийного цикла травления. В первой стадии цикла производится травление кремния через маску на сравнительно небольшую глубину в среде эле-газа (SF₆) (рис. 5а). Во второй стадии цикла производится пассивация стенок протравленного профиля с помощью, например, разряда на основе хладона-318 (C₄F₈) (рис. 5б). В следующем цикле травления ионная компонента разряда удаляет пассивирующую слой полимера со дна канавки и углубляет ее, в то время как боковые стенки канавки остаются защищенными маскирующим слоем полимера (рис. 5в). Далее снова проводится пассивирующая стадия и т. д. В результате травление идет только в вертикальном направлении с небольшими периодическими подтравами в боковых направлениях.

Возбуждение плазмы в различных источниках может быть обеспечено использованием как радиочастотного диапазона волн, так и микроволнового. При этом способ индуктивного возбуждения плазмы в настоящее время признан как, возможно, самый простой и управляемый. ICP-процесс основан на простом принципе функционирования: период изменения осевого магнитного поля (при подаче тока ВЧ на катушку) порождает азимутальное электрическое поле, которое эффективно ограничивает плазменный поток. При этом плазменный поток не пересекает стенки камеры, что обеспечивает минимальное поступление загрязняющих веществ в реакционный объем. Область плазмы высокой интенсивности расположена вплотную к боковым стенам камеры, и амбиполярная диффузия обеспечивает очень однородную плазму внутри камеры. Энергия ионов, попадающих на поверхность подложки, может независимо управляться путем подачи ВЧ-смещения на электрод с образцом. Этот простой принцип функционирования допускает изменение режимов обработки в широком диапазоне и обеспечивает удобство в управлении технологическим процессом, что невозможно при использовании таких способов, как, например, RIE и MERIE. Также нет необходимости

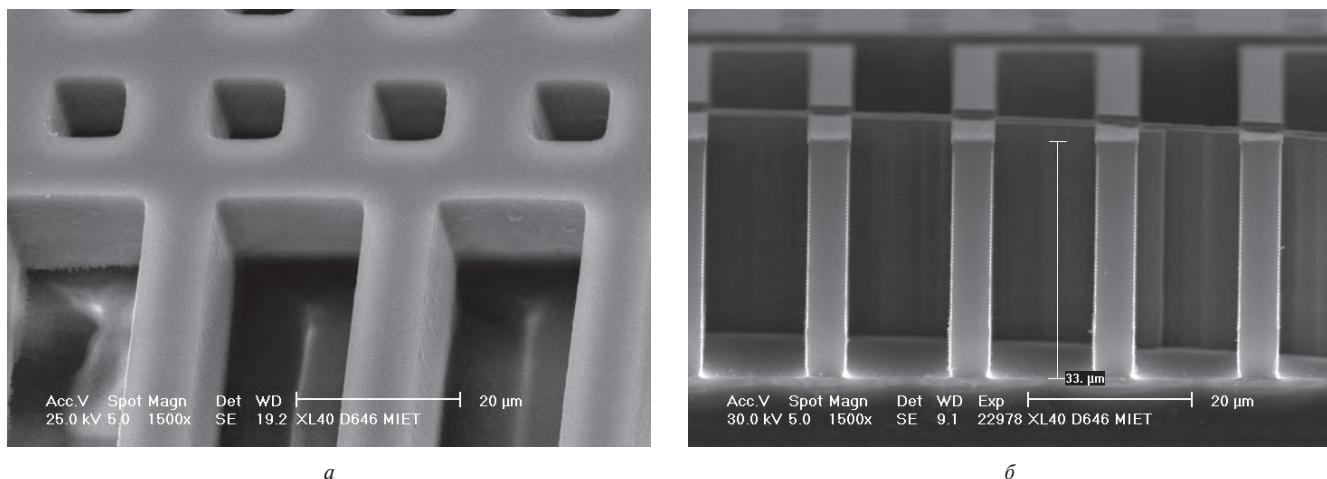


Рис. 8. Фотографии структур чувствительного элемента микроакселерометра

в использовании сложных катушек магнитных полей, микроволновых компонентов для возбуждения плазмы, что значительно снижает стоимость оборудования, использующего источник ICP. ICP является наиболее оптимальным плазменным источником для глубокого анизотропного травления кремния с высоким аспектным отношением.

Один из разработанных режимов травления глубоких канавок в кремнии с использованием Bosch-процесса включает следующие параметры, приведенные в табл. 1.

С использованием данного режима травления получен профиль гребенки: ширина выступов составляет 10 мкм, высота — 100 мкм. Вертикальность профиля — $90 \pm 0,5$ мкм.

Следует заметить, что глубокое травление кремния на структуре КНИ имеет важную особенность, приводящую к подтраву профиля в его нижней части. Этот эффект обусловлен отражением ионов от диэлектрической прослойки структуры КНИ вследствие накопления электростатического заряда на диэлектрической поверхности и известен под названием notching-эффекта. Принцип его возникновения показан на рис. 6.

Один из практических примеров проявления notching-эффекта представлен на рис. 7.

Вследствие проявления «апертурного» эффекта, т. е. зависимости скорости травления от ширины щели, в широких канавках (левая канавка на рис. 7) поверхность диэлектрика достигается раньше, чем в узких (правая канавка на рис. 7). И, пока идет дотравливание узкой канавки, на дне широкой проявляется notching-эффект в соответствии с механизмом, показанным на рис. 6.

Один из способов значительного ослабления или даже исключения notching-эффекта предполагает использование в качестве источника смещения, подаваемого на обрабатываемую подложку, не высокочастотного генератора, а генератора со сравнительно низкой частотой. Кроме того, напряжение смещения подается на электрод-подложкодержатель не непрерывно, а в виде коротких импульсов. Это приводит к «рассасыванию» электростатического заряда на поверхности диэлектрика и к предотвращению notching-эффекта.

При формировании структур чувствительного элемента микроакселерометра был использован режим глубокого

травления кремния без notching-эффекта. В результате были получены структуры с профилями, показанными на рис. 8.

Таким образом, проведенные расчеты (статический и модальный анализ) показали работоспособность конструкции ЧЭ MMA. Проведенные расчеты позволили получить численные значения некоторых параметров MMA: масштабного коэффициента и нелинейности преобразования. Bosch-процесс с подобранными в ходе выполнения работы параметрами и способ исключения notching-эффекта позволили получить опытные образцы требуемой геометрической формы.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются:

- разработанная оригинальная конструкция ЧЭ MMA;
- результаты проведенных расчетов (статический и модальный анализ), подтверждающий ее работоспособность;
- разработанный технологический режим травления глубоких канавок в кремнии с использованием Bosch-процесса;
- разработанный способ значительного ослабления или даже исключения notching-эффекта, позволяющий получить ЧЭ заданной геометрической формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нано- и микросистемная техника. От исследований к разработкам. Сборник статей под редакцией д. т. н., профессора П. П. Мальцева. — Москва: Техносфера, 2005. — 592 с.
2. Мокров Е. А. Интегральные датчики. Состояние разработок и производство. Направления развития, объемы рынка // Датчики и системы. — 2000. — № 1. — С. 28–30.
3. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферова М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.
4. Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Тимошенков С. П. Введение в конечно-элементный анализ. Использование ANSYS в задачах математической физики: Уч. пособие. — М.: МИЭТ, 2007. — 280 с.
5. Тимошенков С. П., Калугин В. В., Анчутин С. А., Коцурина Е. С., Мукимов Д. Ж., Чжо Мьё Аунг, Парфенов Н. М. Исследование и разработка методов оценки основных параметров микромеханических преобразователей линейного ускорения // Мехатроника, автоматизация, управление. Москва, 2015. — Т. 16. — № 6. — С. 422–426.