



УДК 621.3.049.779

DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.437.440

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УДАРА

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A MICROMECHANICAL SHOCK SENSOR

КОЧУРИНА ЕЛЕНА СЕГЕЕВНА<sup>1,2</sup>

ekoichurina@mp-lab.ru

KOCHURINA E. S.<sup>1,2</sup>

ekoichurina@mp-lab.ru

ВИНОГРАДОВ АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ<sup>1,2</sup>

plavec@list.ru

VINOGRADOV A. I.<sup>1,2</sup>

plavec@list.ru

БОЕВ ЛЕОНИД РОМАНОВИЧ<sup>1,2</sup>

leo.boev@mail.ru

BOEV L. R.<sup>1,2</sup>

leo.boev@mail.ru

ЗАРЯНКИН НИКОЛАЙ МИХАЙЛОВИЧ<sup>1,2</sup>

n.zaryankin@mail.ru

ZARYANKIN N. M.<sup>1,2</sup>

n.zaryankin@mail.ru

АНЧУТИН СТЕПАН АЛЕКСАНДРОВИЧ<sup>1,2</sup>

step@mail.ru

ANCHUTIN S. A.<sup>1,2</sup>

step@mail.ru

ТИМОШЕНКОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ<sup>1,2</sup>

at@mp-lab.ru

TIMOSHENKOV A. S.<sup>1,2</sup>

at@mp-lab.ru

<sup>1</sup> ООО «Лаборатория Микроприборов»

124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1

<sup>1</sup> Laboratory of Microdevices Ltd

6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia

<sup>2</sup> National Research University of Electronic Technology

1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

Приведено описание разработанной конструкции микромеханического датчика удара, представлены результаты моделирования. Приведены результаты экспериментальных исследований, показывающие работоспособность разработанной конструкции.

*Ключевые слова:* микромеханический датчик удара; кремний на изоляторе; глубокое травление; метод конечных элементов; МЭМС; результаты экспериментальных исследований.

The paper presents the developed design of a micromechanical shock sensor and results of modeling: model analysis, analysis under the impact. Besides, it gives the test results showing the correspondence of the manufactured sensors.

*Keywords:* micromechanical shock sensor; silicon on insulator; deep etching; finite element method; MEMS; experimental research results.

Микромеханические датчики удара применяются для фиксации ударного воздействия, превышающего определенное значение. Области применения подобных устройств очень широки — в бытовой, транспортной, аэрокосмической, специальной и других отраслях. Основными достоинствами таких МЭМС являются: низкое энергопотребление, малые габариты и масса, высокая ударопрочность, а также невысокая стоимость при серийном производстве. Следовательно, исследования и разработка в области создания микромеханических датчиков удара являются актуальными.

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

В статье представлена оригинальная конструкция микромеханического датчика удара, изготовленного на основе технологии объемной микрообработки кремния. Датчик удара представляет собой нормально разомкнутый инерциальный ключ, обеспечивающий замыкание контактов при воздействии удара вдоль оси чувствительности. Структура датчика приведена на рис. 1.

Микромеханический датчик удара состоит из основания, крышки и центральной части, включающей инерционную массу, которая подвешена при помощи упругих элементов (торсионов). При достижении номинального значения ударного воздействия инерционная масса приводит к замыканию металлизированных контактов, расположенных на крышке и инерционной массе (рис. 1). Таким образом, замыкается электрическая цепь и датчик срабатывает.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Моделирование конструкции проводилось при помощи программной системы конечно-элементного анализа. Суть анализа заключается в том, что любую непрерывную величину (в нашем случае перемещение) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе элементов [1]. Коэффициенты функций обычно ищут из условия равенства значений соседних функций на границах между элементами. Составляется система линейных алгебраических уравнений.

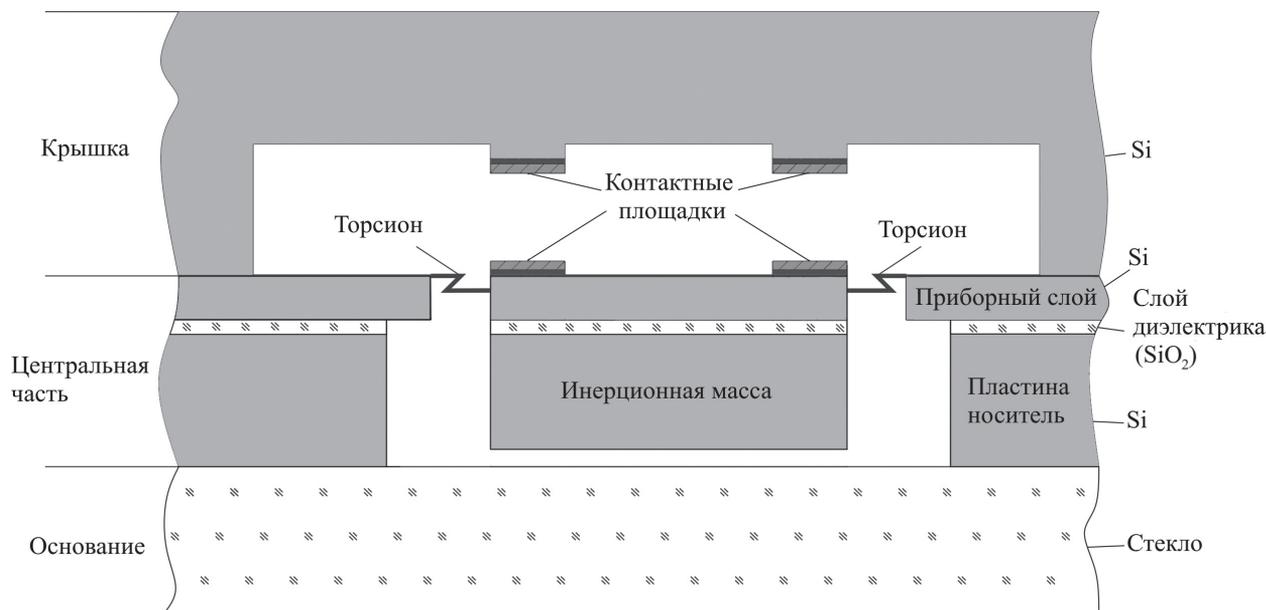


Рис. 1. Структура микромеханического датчика удара

Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых определяется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов [2].

При проведении моделирования в качестве материала был выбран кремний со следующими характеристиками:

- плотность 2328 кг/м<sup>3</sup>;
- коэффициент Пуассона 0,26;
- модуль Юнга 169 ГПа.

Проведенный модальный анализ позволил определить собственные частоты разработанной конструкции: 2128, 3537, 3537, 6969, 6969, 14849 Гц. Вторая собственная частота почти в два раза превышает значение первой собственной частоты.

В рамках выполнения работы необходимо было разработать конструкцию микромеханического датчика удара с уровнем срабатывания 200 г. В ходе работы был проведен статический анализ конструкции. Расчеты показали, что при таком воздействии смещение инерционной массы составляет 11,8 мкм, следовательно, крышку необходимо располагать на расстоянии 10–11 мкм. Изменяя геометрию торсионов с небольшим изменением разработанного технологического процесса, можно изготовить микромеханический датчик удара с широким диапазоном уровней срабатывания от 0,5 до 300 г. При расчете задавалось воздействие удара величиной 200 г, максимальная деформация материала при этом составляла  $1,09 \cdot 10^8$  Па, что превышает предел прочности для кремния  $10^9$  Па [3].

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УДАРА

Датчик удара был изготовлен из КНИ-структуры с ориентацией рабочего слоя (111). Использование структуры КНИ позволяет получать упругие элементы в рабочем слое с толщиной, равной либо меньшей толщины приборного слоя, избегая операции глубокого прецизионного травления пластины носителя с обратной стороны структуры. Формирование толщины торсионов путем травления пластины носителя с обратной стороны КНИ-структуры на большую глубину сопряжено с большим разбросом толщины подвесов по диаметру пластины, что приводит

к большому разбросу в уровнях срабатывания и, как следствие, к малому количеству годных.

Для достижения требуемых упругих и инерционных характеристик датчика удара необходимо добиться высокой точности воспроизведения размеров и геометрии. Поэтому при производстве для изготовления была разработана технология с применением специальных процессов, позволяющих реализовать глубокое травление кремния на глубину более 100 мкм с аспектным соотношением 1 : 25 [4].

В настоящее время существует множество методов для глубокого травления кремния с использованием плазмы. Проведенные исследования показали, что наиболее оптимальным для кремниевых МЭМС является использование Bosch-процесса [5].

Параметрами разработанного глубокого травления кремния являются:

Мощность ICP-разряда	1500 Вт
Давление в реакторе	4,5 Па
Температура электрода	10 °С
Мощность генератора смещения (400 кГц)	150 Вт
Расходы рабочих газов (SF <sub>6</sub> /C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> )	200/100 см <sup>3</sup> /мин
Кристалл ЧЭ присоединяется к основанию методом анодного сращивания. Важнейшим критерием при выборе стекла для анодной сварки является близость ТКЛР стекла и кремния. Поскольку процесс проводится при относительно высоких температурах, а конечные устройства эксплуатируются в широком диапазоне температур, наличие механических напряжений, вызванных разницей ТКЛР, может плохо сказаться на эксплуатационных характеристиках устройств. При больших различиях ТКЛР могут наблюдаться разрушения структур, а также недопустимые деформации элементов устройств. По этим причинам ТКЛР используемого стекла должен быть максимально близок к ТКЛР кремния.	

Исходя из требований, в качестве основания используют стекло Vогоfloat 33, так как ТКЛР данной марки стекла максимально близок к ТКЛР кремния (рис. 2) [6].

Исходя из требований, в качестве основания используют стекло Vогоfloat 33, так как ТКЛР данной марки стекла максимально близок к ТКЛР кремния (рис. 2) [6].

Из графика видно, что ТКЛР кремния и стекла максимально совпадают в диапазоне температур 250–300 °С; исходя из этого, для проведения процесса анодного сращивания была выбрана температура 300 °С.



**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

В результате проведенных расчетов, проведенного моделирования, разработанного технологического маршрута изготовления получен микромеханический датчик с габаритными размерами 3,2×3,2×1,4 мм (рис. 3).

Исследования изготовленных микромеханических датчиков удара проводили на поворотном столе. При помощи специализированной оснастки датчик фиксировали на поворотном столе, величина воздействия определялась скоростью вращения центрифуги. На рис. 4 приведены результаты проведенных исследований. По оси абсцисс указан порядковый номер датчика, по оси ординат — значение уровня срабатывания.

Проведенный анализ результатов испытаний показал, что из 30 изготовленных датчиков удара:

- 9 штук (30% от общего количества испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 194 до 206 г (что составляет 1–3% от расчетного уровня 200 г);
- 12 штук (40% от общего количества испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 186 до 214 г (что составляет 3–7% от расчетного уровня 200 г);
- 9 штук (30% от общего количества испытываемых датчиков) имеют уровень срабатывания в диапазоне от 180 до 220 г (что составляет 7–10% от расчетного уровня 200 г).

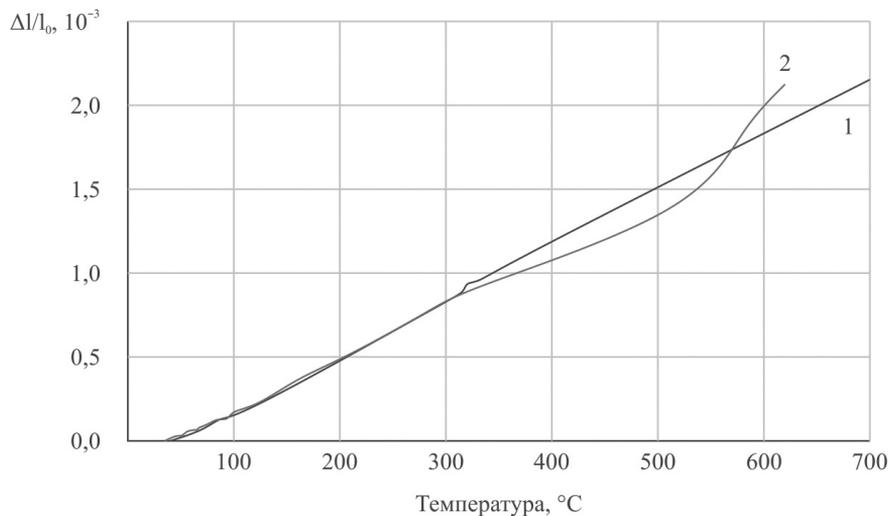


Рис. 2. Сравнение зависимостей относительного удлинения от температуры, где: 1 — кремний; 2 — стекло Borofloat 33 [6]



Рис. 3. Фотография микромеханических датчиков удара

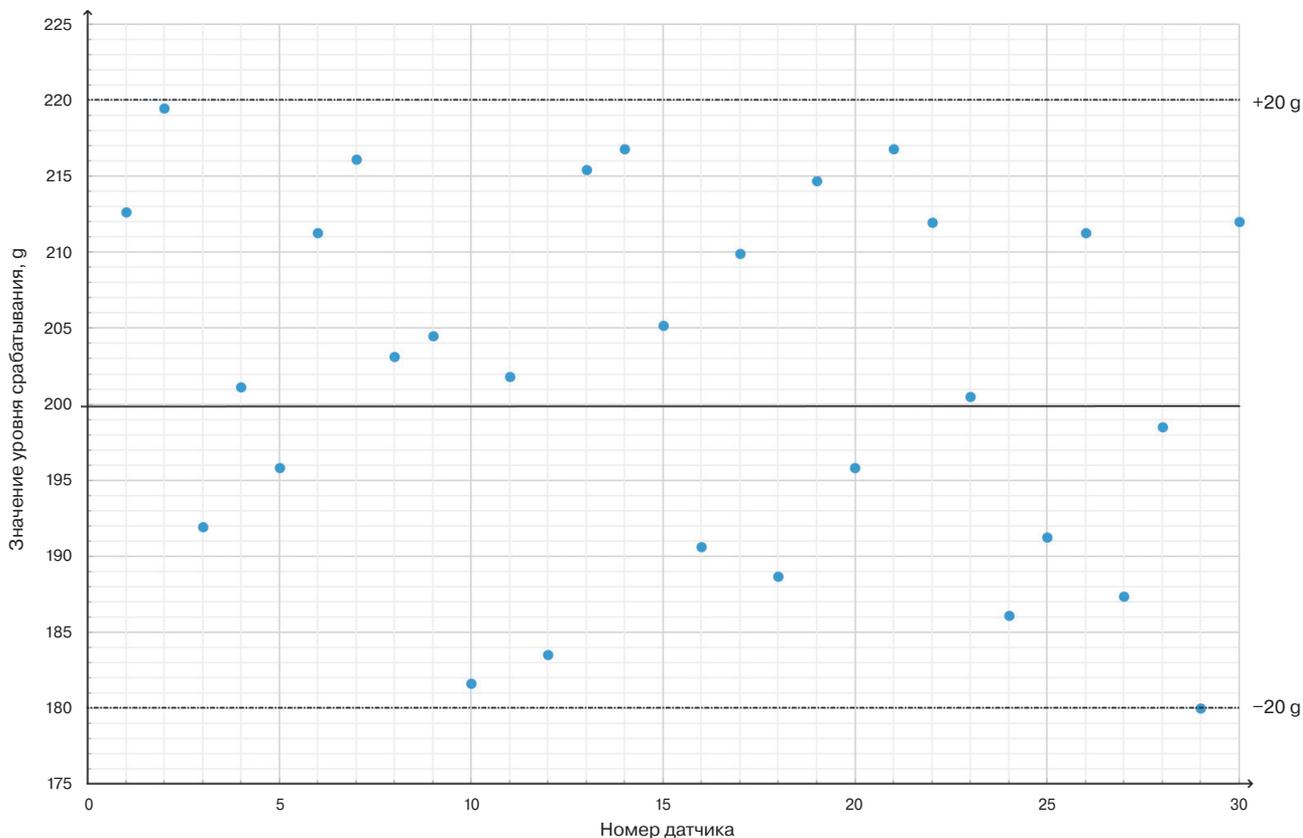


Рис. 4. Результаты измерения уровня срабатывания датчиков удара



По результатам проведенных испытаний видно, что предложенная технология обеспечивает изготовление датчиков с разбросом 10 % (рис. 4).

### ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы разработана конструкция микромеханического датчика удара, описан принцип работы. Приведены результаты моделирования датчика удара. В ходе расчетов была определены собственные частоты разработанной конструкции, «рабочая» частота составила 2128 Гц. По результатам статического расчета определена величина смещения инерциальной массы 11,2 мкм при воздействии 200 г, максимальная деформация материала при этом —  $1,09 \cdot 10^8$  Па.

Разработанный микромеханический датчик удара имеет следующие параметры:

- перегрузка при превышении обеспечения замыкания ключа — 180–220 г;
- внешние габаритные размеры элемента — не более  $3,2 \times 3,2 \times 1,4$  мм.

Датчики удара изготовлены на основе КНИ-структуры. Для обеспечения травления кремния разработана технология создания объемной структуры на основе Bosch-процесса. Проведенные исследования показали, что изготовленные датчики удара имеют уровень срабатывания 200 г с разбросом 10 %.

Более подробно с датчиками удара серии КМГ можно ознакомиться на сайте [www.mp-lab.ru](http://www.mp-lab.ru).

### НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- 1) разработана конструкция датчика удара, проведенные расчеты и моделирование подтвердили ее работоспособность;
- 2) разработана технология создания датчика удара на основе Bosch-процесса;
- 3) изготовлены экспериментальные образцы датчика удара на основе КНИ-структуры;
- 4) проведены исследования экспериментальных образцов датчиков удара.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферова М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.
2. Анчутин С. А., Плеханов В. Е., Тимошенко С. П. Введение в конечно-элементный анализ. Использование ANSYS в задачах математической физики: Уч. пособие. — М.: МИЭТ, 2007. — 280 с.
3. Winteler H. R., Gantsch G. H. Piezoresistive Druckaufnehmer. Kistler. 1984. P. 8.
4. Blauw M. A., Craciun G., Sloof W. G., French P. J., van der Drift E. Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silico structures // J. vac. Sci. technol. B., 2002. Vol. 20. P. 3106–3110.
5. Тимошенко С. П., Калугин В. В., Анчутин С. А., Зарянкин Н. М., Кочурина Е. С. Особенности конструкции и технологии изготовления чувствительного элемента микроакселерометра. — Наноиндустрия, 2019. Спецвыпуск (89). — 480 с.
6. Скупов А. Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники, ВЕКТОР высоких технологий № 5 (18) 2015. — 36 с.