

СПЕЦВЫПУСК  
NANOINDUSTRY

НАНО

ISSN 1993-8578 (print)  
ISSN 2687-0282 (online)  
DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s

СПЕЦВЫПУСК 8s. том 15  
2022



На двух языках



DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s

ISSN 1993-8578 (print)

ISSN 2687-0282 (online)



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ  
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2021

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ

«Микроэлектроника-2021»

Часть I

7-я Научная конференция

«Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»

Сборник докладов

Республика Крым,  
г. Алушта, 03–09 октября 2021 г.



ТЕХНОСФЕРА



УДК 621.3.049.779

DOI: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.235.238

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A MEMS-ACCELEROMETER

КОЧУРИНА ЕЛЕНА СЕРГЕЕВНА<sup>1,2</sup>

*ekoichurina@mp-lab.ru*

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

*ekoichurina@mp-lab.ru*

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

*step305@mail.ru*

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

*step305@mail.ru*

МУСАТКИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ<sup>1,2</sup>

*musatkin.a@hotmail.com*

MUSATKIN ALEKSANDR S.<sup>1,2</sup>

*musatkin.a@hotmail.com*

ДЕРНОВ ИЛЬЯ СЕРГЕЕВИЧ<sup>1,2</sup>

*i.s.dernov@yandex.ru*

DERNOV IL'YA S.<sup>1,2</sup>

*i.s.dernov@yandex.ru*

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

*at@mp-lab.ru*

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

*at@mp-lab.ru*

ПОЛУШКИН ВЯЧЕСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ<sup>3</sup>

POLUSHKIN VYACHESLAV M.<sup>3</sup>

ТИМОШЕНКОВ СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ<sup>2</sup>

*spt111@mail.ru*

TIMOSHENKOV SERGEJ P.<sup>1</sup>

*spt111@mail.ru*

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

124498, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6

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

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

<sup>3</sup> ФГБУ «46 ЦНИИ» Министерства обороны

Российской Федерации

129327, г. Москва, Чукотский пр-д, 10

<sup>1</sup> SMD Ltd

6 Solnechnaya Alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia

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

1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia

<sup>3</sup> 46 Central Research Institute of the Ministry of Defense

of the Russian Federation

10 Chukotsky Lane, Moscow, 129327

Приведено описание разработанной конструкции чувствительного элемента МЭМС-акселерометра, представлены результаты моделирования. Приведено описание разработанного стенда для проведения исследований. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* чувствительный элемент; МЭМС-акселерометр; автоматизированный стенд; результаты экспериментальных исследований.

The paper highlights the developed geometric model of the sensor MEMS-accelerometer. Besides, it presents the automated test bench, as well as the results of experimental studies of MEMS-accelerometers.

*Keywords:* sensor; MEMS-accelerometer; automated test bench; experimental results.

МЭМС-акселерометры имеют малые габаритные размеры и массу, низкое энергопотребление, при серийном производстве будут иметь невысокую стоимость. Применяют МЭМС-акселерометры как в изделиях массового спроса, таких как системы безопасности автомобилей, потребительская электроника (сотовые телефоны, ноутбуки и пр.), робототехника, так и в приборах специального назначения: военной и аэрокосмической технике, медицинском оборудовании, промышленных системах управления.

Разработанный чувствительный элемент микромеханического акселерометра представляет собой конструкцию маятникового типа. Инерционная масса, подвешенная к основанию при помощи упругих элементов (торсионов), воспринимает действующее ускорение и является одной из обкладок емкостной системы съема сигнала. В качестве неподвижной обкладки используется стеклянная пластина с напыленными электродами [1].

Момент упругости, возникающий в торсионе при действии ускорения, имеет следующий вид:

$$M_{упр} = K \cdot \varphi, \quad (1)$$

где  $K$  — коэффициент жесткости на кручение,  $\varphi$  — угол отклонения ЧЭ при действии ускорения.

При действии ускорения на подвижную часть чувствительного элемента возникает крутящий момент  $M_{кр}$ :

$$M_{кр} = c \cdot m \cdot a, \quad (2)$$

где  $c$  — смещение центра масс ЧЭ,  $a$  — действующее ускорение,  $m$  — масса чувствительного элемента.

Уравнение, описывающее движение чувствительного элемента МЭМС-акселерометра, имеет следующий вид [2, 3]:

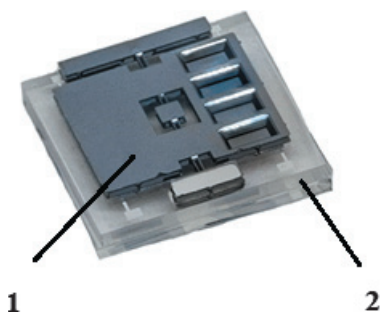


Рис. 1. Разработанный чувствительный элемент МЭМС-акселерометра: 1 — инерционная масса, 2 — стеклянная пластина с напыленными электродами

$$J \cdot \ddot{\varphi} + b \cdot \dot{\varphi} + K \cdot \varphi = M_{кр}, \quad (3)$$

где  $J$  — момент инерции ЧЭ относительно оси вращения,  $b$  — коэффициент демпфирования,  $K$  — коэффициент жесткости на кручение ЧЭ,  $\varphi$  — угол отклонения ЧЭ при воздействии ускорения.

Величина коэффициента жесткости на кручение торсиона определяется в том числе геометрическими параметрами. При действии ускорения момент упругости  $M_{упр}$  ЧЭ компенсирует крутящий момент. С учетом выражений (2) и (3) можно записать:

$$M_{упр} = M_{кр} \rightarrow K \cdot \varphi = c \cdot m \cdot a. \quad (4)$$

При этом угол отклонения ЧЭ —  $\varphi$  пропорционален величине воздействующего ускорения:

$$\varphi = \frac{c \cdot m \cdot a}{K}. \quad (5)$$

Собственная частота ЧЭ определяется выражением  $\omega_0^2 = \frac{K}{J}$ ,

$J$  — момент инерции ЧЭ, следовательно, с учетом выражения (5)

$$\omega_0^2 = \frac{K}{J} = \frac{c \cdot m}{\varphi \cdot J} \cdot a. \quad (6)$$

Таким образом, квадрат собственной частоты ЧЭ прямо пропорционален массе и смещению центра масс, обратно пропорционален моменту инерции.

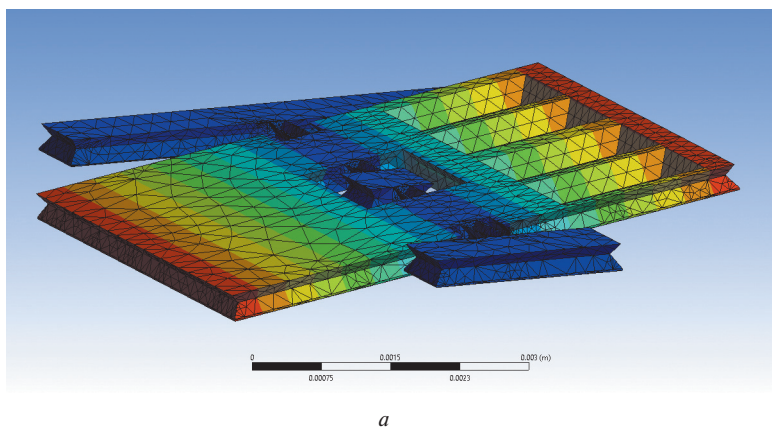
Для расчетов используют как аналитические, так и численные методы. Первые базируются на математических методах решения

задач, обычно сложных и трудоемких, и часто ограничены достаточно простыми формами конструкций. Численные методы, например метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод конечных элементов и другие методы, не ограничены ни геометрическими размерами, ни способом приложения нагрузки. Это, наряду с повсеместным распространением мощной вычислительной техники, способствует их распространению в инженерной среде. Нередко когда важно знать эволюцию процесса деформирования (разрушения) конструкции с продолжающимся во времени внешним воздействием. При этом естественны большие геометрические и физические нелинейности. В таких случаях обойтись без численных решений практически невозможно. Механическая и математическая основа указанного программного комплекса представляет собой метод конечных элементов (МКЭ) — наиболее распространенный и достаточно универсальный метод анализа напряженно-деформированного состояния.

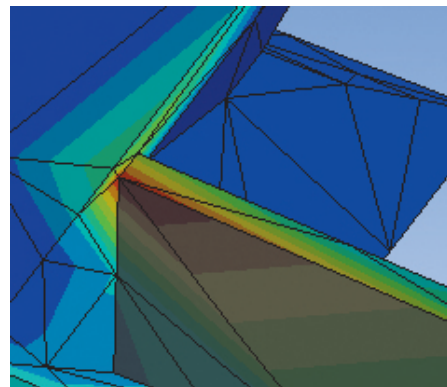
Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную величину (перемещение, температура, давление и т. п.) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных элементов (участков). На каждом из этих элементов исследуемая непрерывная величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, которая строится на значениях исследуемой непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемого элемента. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. После этого можно перейти к общему случаю [4].

При разработке конструкции ЧЭ было проведено моделирование конструкции при помощи конечно-элементного анализа. Был проведен модальный анализ и рассчитаны собственные частоты конструкции, которые составляют: 1148, 25854, 30444, 39890, 40954, 42658 Гц. Первая (рабочая) и вторая частоты различаются в 20 раз, что говорит об оптимально выбранной геометрии ЧЭ и минимальном влиянии других собственных частот.

При изготовлении чувствительного элемента был использован метод анизотропного травления кремния, который обеспечивает не только высокое качество травления, но и сравнительно высокую скорость травления, низкую стоимость и хорошую воспроизводимость результатов, что является решающими факторами при значительной глубине травления, необходимой для формирования объемных фигур травления различных конструкций. Формирование зазора между кремниевым чувствительным элементом и статорной пластиной осуществляется при помощи метода анодного срачивания.

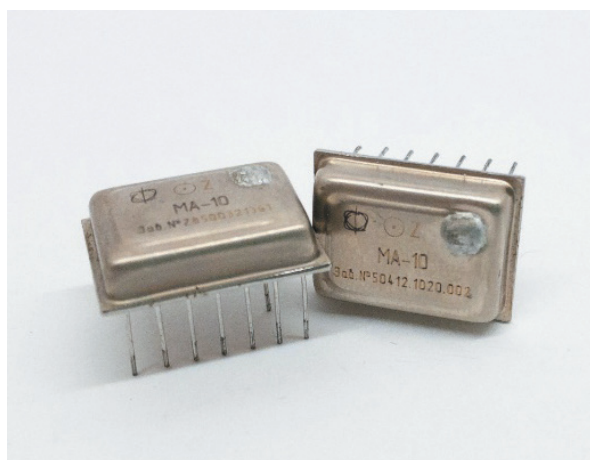


а

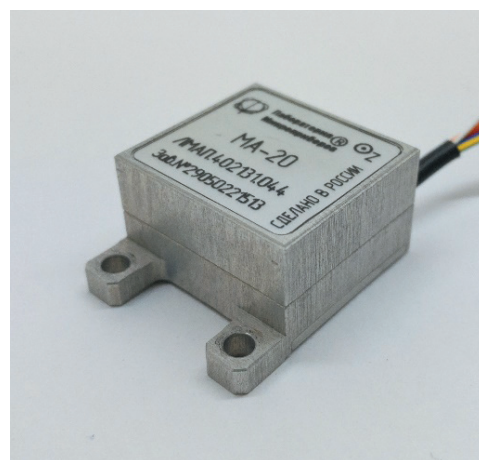


б

Рис. 2. Результаты статического анализа конструкции ЧЭ: а) смещение при воздействии ускорения 5g; б) напряженно-деформируемое состояние при воздействии ускорения 50g



а



б

Рис. 3. МЭМС-акселерометр: а) тип MA-10; б) тип MA-20

Проведенный статический расчет конструкции показал, что при воздействии ускорения 5g чувствительный элемент перемещается на 3,6 мкм (рис. 2а). Методом анодного сращивания был создан зазор, равный 8 мкм. ЧЭ работает в половине сформированного зазора: при перемещении до 4 мкм снижается чувствительность датчика к воздействию ускорению, при перемещении выше 4 мкм — к возможному «залипанию».

На рис. 2б приведены результаты расчета — напряженно-деформируемое состояние торсионов и суммарное значение напряжения материала по критерию Мизеса [5]. Напряжение материала при воздействии ускорения в 10 раз больше рабочего и составляет  $1,8 \cdot 10^3$  Па (предел прочности для кремния —  $10^9$  Па [6]).

ООО «Лаборатория Микроприборов» совместно с Институтом НМСТ МИЭТ разработало МЭМС-акселерометры типа MA-10 и MA-20 (рис. 3). Более подробно с МЭМС-акселерометрами типа MA-10 и MA-20 можно ознакомиться на сайте [www.mp-lab.ru](http://www.mp-lab.ru).

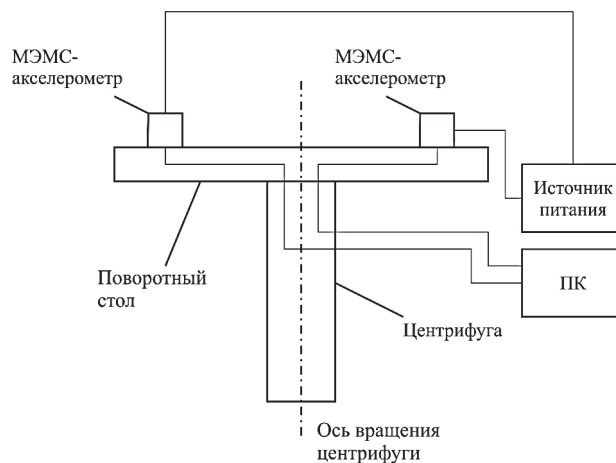


Рис. 3. Функциональная схема автоматизированного стенда

Таблица 1. Результаты испытаний опытных образцов микромеханических акселерометров типа MA-10 и MA-20 и сравнение с аналогами других производителей [7–10]

Параметр	MA-10 ООО «ЛМП» (г. Зеленоград)	AT1105-50 ПАО «АНПП «ТЕМП-АВИА» (г. Арзамас)	ММА-ЭП1 ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт-Петербург)	ADX1002 Analog Devices	ADcmXL1021-1 Analog Devices	MS9050 Safran Colibrys SA
Диапазон измерения кажущихся ускорений, g	±50	±50	±15	±50	±50	±50
Нелинейность статической характеристики, %	0,1	±0,5	<0,3	±0,1	±0,2	<0,9
Спектральная плотность «шума» выходного сигнала, mg/√Гц	0,3	—	<0,01 g/√Гц	25 μg/√Гц	32 μg/√Гц	24 μg/√Гц
Нестабильность смещения нуля (по диаграмме Аллана при 25 °С), mg	0,5	—	<1	—	—	—
Диапазон рабочих температур, °С	−40...+85	−50...+60	−55... +85	−40...+125	−55...+125	−55...+125
Напряжение питания, В	3,3	−12...+12	5	5	−0,3...+3,6	2,5...5
Потребляемый ток, mA	2	20	—	1	100	0.4
Габаритные размеры, мм	19,5×14,5×5	29,5×28,5×16	40,0×40,0×8,2	5×5×1,8	23,8×27,1×12.5	8,9×8,9×3,23



Проведенные расчеты и разработанный технологический маршрут на основе анизотропного травления кремния позволили изготовить МЭМС-акселерометры типа МА-10 и МА-20. Каждый МЭМС-акселерометр типа МА-10 и МА-20 содержит ЧЭ и плату преобразования сформированных емкостей в выходной сигнал датчика. Плата преобразования датчиков типа МА-10 позволяет получить выходной сигнал датчика в цифровом виде (интерфейс UART). Наличие 32-разрядного микроконтроллера позволяет реализовать температурную компенсацию. МЭМС-акселерометр МА-20 выдает выходной сигнал в виде напряжения, пропорционального проекции кажущегося ускорения на измерительную ось.

Исследования изготовленных образцов МЭМС-акселерометров проводили на автоматизированном стенде. Функциональная схема стенда приведена на рис. 3.

Испытываемые образцы МЭМС-акселерометров устанавливали на поворотном столе, так чтобы ось чувствительности датчика была перпендикулярна оси вращения центрифуги. Необходимое ускорение, подаваемое на МЭМС-акселерометр, формировалось при помощи вращения поворотного стола. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить испытания в автоматическом режиме: задавать необходимую угловую скорость вращения поворотным столом, записывать выходные данные с датчиков, рассчитывать параметры МЭМС-акселерометра. Стенд позволяет определить основные параметры МЭМС-акселерометра: смещение нуля, масштабный коэффициент, нелинейность статической характеристики.

Результаты проведенных исследований сведены в сравнительную табл. 1 (данные для аналогов взяты из открытых источников). Опыт при создании трехмерных структур ЧЭ МЭМС-акселерометров позволяет разрабатывать ЧЭ МЭМС-ДУС.

## ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы разработана конструкция ЧЭ, проведены расчеты, подтверждающие ее работоспособность. На основе разработанных ЧЭ изготовлены экспериментальные образцы МЭМС-акселерометров типа МА-10 и МА-20. Собран автоматизированный стенд и разработано программное обеспечение, позволяющие определять характеристики МЭМС-акселерометров в автоматическом режиме. Проведены исследования экспериментальных МЭМС-акселерометров типа МА-10 и МА-20, результаты сведены в сравнительную таблицу. Потенциально датчики данной серии могут использоваться для охранных комплексов, построения инклинометров, систем ориентации.

## НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ

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

- 1) разработана конструкция ЧЭ, на базе которой изготовлены экспериментальные образцы МЭМС-акселерометров;
- 2) разработана технология, позволяющая выпускать экспериментальные образцы МЭМС-акселерометров;
- 3) изготовлены экспериментальные образцы МЭМС-акселерометров типа МА-10 и МА-20;
- 4) собран автоматизированный стенд и разработано программное обеспечение, позволяющие определять характеристики МЭМС-акселерометров в автоматическом режиме;
- 5) проведены исследования экспериментальных образцов МЭМС-акселерометров типа МА-10 и МА-20, результаты сведены в сравнительную таблицу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко А. С., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Мусаткин А. С., Головинский М. С., Калугин В. В., Пузиков В. В., Тимошенко С. П. Разработка и исследование микромеханического акселерометра // Микроэлектроника-2019. 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. — Республика Крым, г. Алушта, 30 сентября — 05 октября 2019 г. — Техносфера, Москва. — С. 435–437.
2. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов. — М.: Наука, 1986. — 512 с.
3. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости: Учебн. пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1977. — 216 с.
4. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / Предисл. А. С. Шадского. — Изд. стер. — М.: URSS. ЛИБРОКОМ, 2015. — 272 с.
5. Ву Э. Прочность и разрушение композитов // Композиционные материалы [Текст]. В 7 т. Т. 2. Разрушение и усталость / под ред. Браутмана Л. — М.: Мир, 1978. — С. 206–266.
6. Winteler H. R., Gantsch G. H. Pezoresistive Druckaufnehmer. Kistler. 1984. 8 p.
7. <http://www.temp-avia.ru/index.php/katalog-produktsii>.
8. <http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/mikromekhanicheskie-chuvstvitelnye-elementy-i-moduli/mma-ep1>.
9. <https://www.analog.com/ru/products>.
10. <https://www.colibrys.com/product/ms9000-mems-accelerometer>.