

И. В. Уваров<sup>1</sup>, мл. науч. сотр.,  
 О. В. Морозов<sup>1</sup>, ст. науч. сотр.,  
 И. А. Козин<sup>1</sup>, электроник,  
 А. В. Постников<sup>1</sup>, ст. науч. сотр.,  
 И. И. Амиров<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, зам. дир-ра,  
 В. А. Кальнов<sup>2</sup>, канд. техн. наук, уч. секр.

<sup>1</sup> Ярославский Филиал Учреждения Российской академии наук Физико-технологического института РАН, г. Ярославль, e-mail: ilnik88@mail.ru

<sup>2</sup> Учреждение Российской академии наук физико-технологический институт РАН, г. Москва

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА С ПОВЫШЕННЫМ ФАКТОРОМ ДЕМПФИРОВАНИЯ

Поступила в редакцию 04.10.2011

*Исследуются динамические характеристики чувствительного элемента (ЧЭ) заданной конструкции, обеспечивающей повышенное воздушное сопротивление. Возбуждение колебаний инерционной массы (ИМ) осуществляется с помощью пьезоэлемента, регистрация колебаний выполняется по отклонению лазерного луча от поверхности ИМ. Получены зависимости резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха в диапазоне от 1 до  $10^5$  Па, а также зависимость добротности от размера воздушного зазора между ИМ и подложкой.*

**Ключевые слова:** маятниковый микроакселерометр, чувствительный элемент, инерционная масса, резонансная частота, добротность, воздушное демпфирование

### Введение

Микроакселерометр (МА) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде упругой консоли или микробалки с инерционной массой (ИМ) является наиболее распространенным типом инерциальных микромеханических устройств [1, 2]. Параметры МА определяются конструкцией и степенью демпфирования его ЧЭ. Демпфирование, обусловленное сопротивлением воздуха, зависит не только от значения воздушного зазора вокруг ЧЭ, но также и от геометрии ЧЭ. Цель работы — исследование динамики ЧЭ заданной конструкции, обеспечивающей повышенное воздушное сопротивление.

### Исследуемый ЧЭ и измерительный стенд

Чувствительный элемент представлял собой ИМ, подвешенную на двух микробалках (рис. 1). Он изготовлялся в кремниевой пластине с использованием процессов глубокого плазменного травления. На противоположной стороне от подвесов ИМ и кремниевая пластина имели встречно-штыревую структуру (ВШС). Такая структура была изготовлена для реализации высокочувствительного интерферометрического метода детектирования перемещения ИМ [3]. Для увеличения демпфирующих свойств ИМ была выполнена в виде мембраны, в центре которой находился объем кремния (рис. 1). Размеры мембраны составляли  $1,4 \times 1,4$  мм, значение ИМ составляло 2,3 мг. Были изготовлены образцы с толщиной подвесов от 12 до 25 мкм.

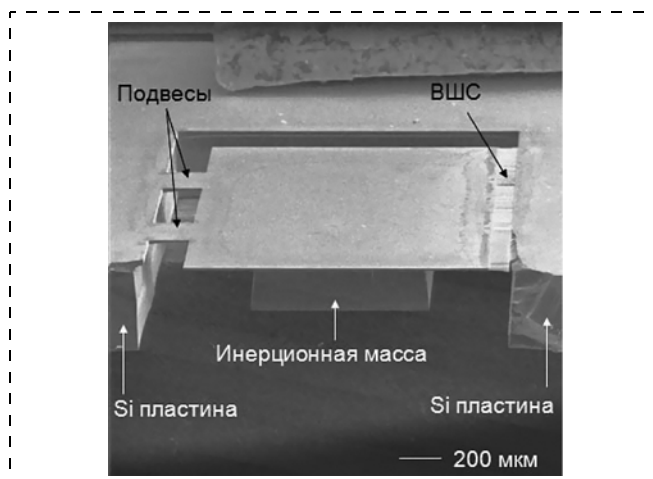


Рис. 1.

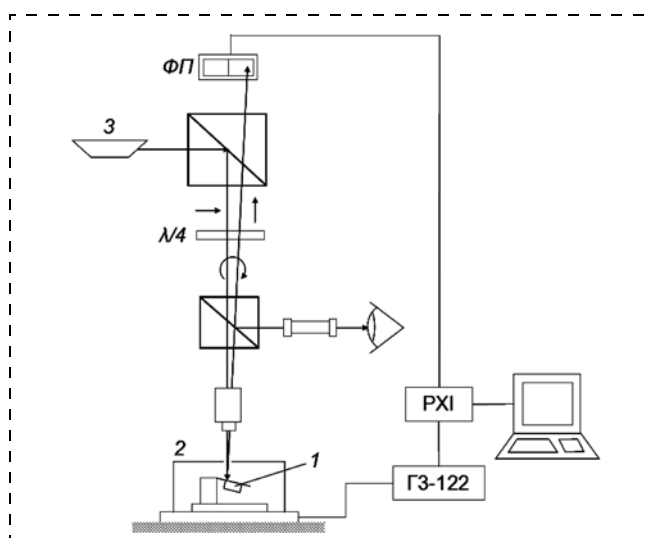


Рис. 2.

Измерение резонансных характеристик проводили на собранном в ЯФ ФТИАН оптическом стенде, схема которого изображена на рис. 2. Образец 1, закрепленный на пьезоэлементе (воздушный зазор между поверхностью ИМ и поверхностью пьезоэлемента составлял 200 мкм), был помещен в вакуумную камеру 2.

На пьезоэлемент подавалось переменное напряжение от генератора ГЗ-122, таким образом возбуждались колебания ИМ. Луч лазера 3 фокусировался на поверхность ИМ, колебания которой вызывали отклонение отраженного луча от начального положения, это отклонение фиксировал фотоприемник ФП. Сбор данных с ФП, а также управление генератором ГЗ-122 осуществлялись с помощью платформы PXI National Instruments и программного обеспечения, написанного в среде графического программирования LabView. Измерения проводили при различных значениях давления воздуха в камере (от 1 до  $10^5$  Па). Строились резонансные кривые образца, по ним определялись его резонансные частоты и добротности (по отношению резонансной частоты к ширине резонансного пика по частоте на уровне убывания его высоты в  $\sqrt{2}$  раз). В таблице представлены значения резонансных частот и добротностей нескольких образцов при давлениях воздуха 1 и  $10^5$  Па.

Основная резонансная частота балки длиной  $L$ , толщиной  $t$ , выполненной из материала с модулем Юнга  $E$  и плотностью  $\rho$ , задается выражением [4]

$$F_p = 1,03 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (1)$$

Согласно (1) резонансная частота  $F_p$  балки пропорциональна ее толщине. Подвесы ИМ имели более сложную форму, поэтому зависимость резонансной частоты ЧЭ от толщины подвесов была смоделирована в пакете COMSOL Multiphysics (метод конечных элементов). Смоделированные резонансные частоты ЧЭ находились в согласии с экспериментально полученными данными. Резонансная частота ЧЭ линейно возрастала приблизительно от 500 Гц до 3 кГц при увеличении толщины подвесов от 12 до 25 мкм.

### Зависимость резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха

При изменении давления воздуха от 1 до  $10^5$  Па наблюдался небольшой сдвиг резонансной частоты образцов. Чем выше было значение резонансной частоты образца, тем сильнее она смещалась по абсолютной величине при переходе от вакуума к стандартным условиям. Однако относительное смещение от значения резонансной частоты зависело слабо и для всех образцов составляло не более 0,3 % (см. таблицу).

График зависимости добротности нескольких образцов от давления воздуха показан на рис. 3. Рассматриваемый диапазон давлений можно было разбить на три области, на каждой из которых преобладал соответствующий источник потерь энергии [5]. В диапазоне от 1

№ образца	$F_{p1}$ , Гц (1 Па)	$F_{p2}$ , Гц ( $10^5$ Па)	$\Delta F$ , Гц	$\Delta F/F_{p1}$ , %	$Q_1$ (1 Па)	$Q_2$ ( $10^5$ Па)
1	1000,60	997,95	2,65	0,27	12872	260
2	1007,35	1004,75	2,60	0,26	4579	283
3	1416,47	1412,50	3,97	0,28	6696	248
4	1418,19	1414,50	3,69	0,26	7340	314
5	1441,08	1437,50	3,58	0,25	10293	411
6	1587,38	1583,30	4,08	0,26	7215	422
7	1905,11	1900,25	4,86	0,25	3346	413
8	2275,62	2269,00	6,62	0,29	6197	353

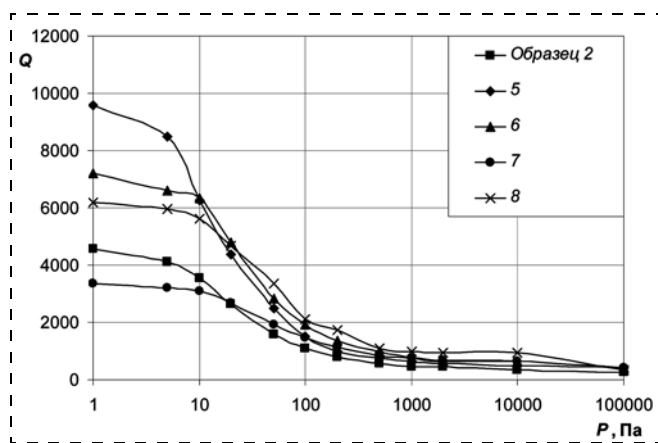


Рис. 3.

до 10 Па основную роль играли потери энергии, происходящие в подвесах ЧЭ при их изгибе (*thermoelastic damping*). В данном диапазоне давлений добротность ЧЭ достигала максимального значения и слабо зависела от давления. Исследуемые образцы имели добротность от 3000 до 13000.

Диапазон давлений от 10 до  $10^3$  Па соответствовал молекулярному режиму — не взаимодействующие друг с другом частицы среды сталкивались с движущимся ЧЭ. В данном режиме добротность ЧЭ уменьшалась с увеличением давления воздуха в камере.

Давлениям воздуха от  $10^3$  до  $10^5$  Па соответствовал вязкостный режим, при этом добротность ЧЭ также слабо зависела от давления, но достигала минимального значения.

### Влияние воздушного зазора между поверхностью ИМ и подложкой на добротность ЧЭ

Для задания требуемого коэффициента демпфирования в инерциальных микромеханических устройствах широко используется эффект сжатия воздуха в зазоре между элементами устройства (*squeezed-film damping*). Добротность ЧЭ, соответствующая этому эффекту, задается выражением [6]:

$$Q = \frac{F_p m \pi^4 h_0^3}{96 \eta L W^3}, \quad (2)$$

где  $F_p$  — резонансная частота ЧЭ;  $h_0$  — толщина воздушного зазора;  $\eta$  — вязкость воздуха;  $L$  и  $W$  — длина и ширина поверхности ЧЭ, создающей сжатие воздуха.

Была исследована зависимость добротности ЧЭ от значения воздушного зазора между поверхностью мембраны и поверхностью, на которую устанавливался ЧЭ (поверхностью пьезоэлемента). Измерения проводили при атмосферном давлении (вязкостный режим). Для создания различных воздушных зазоров образцы устанавливали на полиимидные пленки различной толщины (30, 40, 45, 70, 85 и 145 мкм). Толщину пленок определяли микрометром с точностью 1 мкм.

Зависимость добротности нескольких образцов от значения воздушного зазора показана на рис. 4. Также на графике представлена теоретическая кривая, рассчитанная с помощью выражения (2) для ЧЭ, имеющего резонансную частоту 1 кГц. При воздушных зазорах от 30 до 100 мкм экспериментальные кривые лежали выше теоретической. Возможно это было связано с ошибкой в определении размера воздушного зазора. Воздушный зазор превышал измеренную толщину используемых полиимидных пленок вследствие наличия посторонних частиц между пленкой и образцом и шероховатостей пленок. Также ошибки в определении размера зазора могли быть обусловлены изгибами экспериментальных кривых в области 40–45 мкм. Однако при зазорах 100...140 мкм экспериментальные кривые не уходили вверх так круто, как теоретическая кривая. Это было связано с тем, что с увеличением зазора эффект сжатия воздуха на самом деле постепенно ослабевал и экспериментальные кривые выходили на насыщение.

Для подавления нежелательных колебаний акселерометра необходимо, чтобы коэффициент демпфирования  $\xi$  составлял  $\sim 0,5$ , что соответствует добротности  $\sim 1$  ( $Q = 1/2\xi$ ) [2]. Экстраполяция экспериментально полученных зависимостей (рис. 4) на диапазон  $h < 30$  мкм показывает, что требуемое значение добротности для ЧЭ исследуемой конструкции должно достигаться при  $h \approx 20$  мкм.

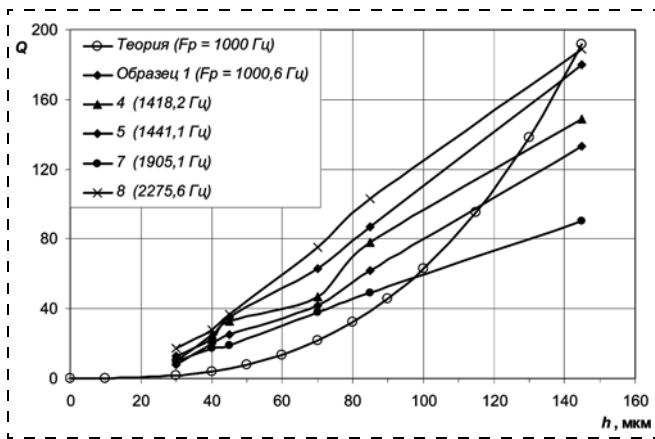


Рис. 4.

Порог чувствительности ЧЭ по ускорению был определен из отношения сигнал/шум ( $SNR$ ) [7]:

$$SNR = \frac{a_s^2 m Q}{4k_b T \omega_0}, \quad (3)$$

где  $a_s$  — измеряемое ускорение;  $k_b$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура. В качестве шума в выражении (3) выступает броуновский шум ЧЭ. Отношение сигнал/шум полагалось равным 1. Порог чувствительности ЧЭ, имеющего массу 2,3 мг, резонансную частоту порядка 1 кГц и добротность, равную 5, составлял  $1 \cdot 10^{-6}$  м/с<sup>2</sup>, что соответствует порогу чувствительности современных МА.

## Заключение

В ходе работы были исследованы динамические характеристики (резонансная частота и добротность) ЧЭ заданной конструкции. Были получены зависимости резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха в диапазоне от 1 до  $10^5$  Па. Также была исследована зависимость добротности ЧЭ от значения зазора между мембраной ЧЭ и подложкой. Мембрана ЧЭ позволяет увеличить площадь поверхности, создающей сжатие воздуха в зазоре, и за счет этого увеличить коэффициент демпфирования. Экспериментальные данные показали, что для достижения требуемого коэффициента демпфирования необходимо обеспечить воздушный зазор  $\sim 20$  мкм между поверхностью мембраны и подложкой, на которую устанавливается ЧЭ.

## Список литературы

1. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
2. **Kaajakari V.** Practical MEMS. Small Gear Publishing, 2009. 460 p.
3. **Cooper E. B., Post E. R., Griffith S.** et al. High-resolution micromachined interferometric accelerometer // Applied Physics Letters. Vol. 27. 2000.
4. **Bannon F. D., Nguyen C. T.-C.** High-Q HF Microelectromechanical Filters. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2000. Vol. 35.
5. **Blom F. R., Bouwstra S., Elwenspoek M.** et al. Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1992. Vol. 10.
6. **Brotz J.** Damping in CMOS-MEMS resonators. Master's project report in Electrical & Computer Engineering at Carnegie Mellon University, 2004. 87 p.
7. **Gabrielson T. B.** Fundamental noise limits in miniature acoustic and vibration sensors. Warminster, PA, Naval Air Development Center, 1991. 101 p.