

Научная статья

УДК 531.768-181.48:681.586.73:004.946

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67

Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра

Е. С. Кочурина^{1,2}, С. А. Анчутин^{1,2}, В. В. Калугин², Н. М. Зарянкин¹,
А. С. Тимошенко^{1,2}, И. С. Дернов^{1,2}

¹ООО «Лаборатория микроприборов», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

ekochurina@mp-lab.ru

Аннотация. Микромеханические акселерометры (ММА) широко применяются в промышленности, а также в робототехнике, так как характеризуются низким энергопотреблением, малыми габаритами и массой, невысокой стоимостью при серийном производстве. Поэтому разработка и исследование ММА является актуальной задачей. В работе при моделировании чувствительного элемента (ЧЭ) ММА использована программная система конечно-элементного анализа, позволяющая провести статический и модальный анализ. Приведены результаты предварительных расчетов масштабного коэффициента ММА, который может быть собран на основе разработанного ЧЭ и сигма-дельта-преобразователя. Описан технологический процесс изготовления ЧЭ ММА с использованием анизотропного жидкостного химического травления кремния для получения различных профилей соответствующих кристаллографических плоскостей. Представлены результаты исследования влияния технологических погрешностей на геометрические размеры ЧЭ: выявлена зависимость величины бокового подтрав кремния от точности углового совмещения маски с кристаллографической осью пластины (100). Проведенное моделирование подтвердило работоспособность конструкции, расчеты показали изменение масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °С, номинальной емкости и емкости при изменении линейного ускорения в диапазоне ± 60 g. При изготовлении ЧЭ на основе проведенных исследований можно получить боковой подтрав не более 5 мкм при глубине анизотропного жидкостного химического травления 250 мкм для пластин КДБ-0,01 с допуском на ориентацию $\pm 30'$ или с разориентацией такой же величины, допущенной во время экспонирования.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, чувствительный элемент, МЭМС, анизотропное жидкостное травление, результаты экспериментальных исследований

Для цитирования: Разработка чувствительного элемента микромеханического акселерометра / Е. С. Кочурина, С. А. Анчутин, В. В. Калугин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 59–67. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67>

Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer

*E. S. Kochurina^{1,2}, S. A. Anchutin^{1,2}, V. V. Kalugin², N. M. Zaryankin¹,
A. S. Timoshenkov^{1,2}, I. S. Dernov^{1,2}*

¹*“Laboratory of Micro-Devices” Ltd., Moscow, Russia*

²*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

ekochurina@mp-lab.ru

Abstract. Micromechanical accelerometers have wide range of applications in industry and robotics due to the main advantages such like low power consumption, small dimensions and weight, low cost in serial production. Therefore, micromechanical accelerometers research and development received priority. In this work, finite element analysis software was used for modeling the sensitive element, for this method allows providing static and modal analysis. The results of preliminary calculations of the scale factor of the accelerometer that can be assembled based on the developed sensor and sigma-delta transducer, are provided. The article describes the technological process of manufacturing sensitive elements of micromechanical accelerometers. In this case, anisotropic liquid chemical etching of silicon was used, which makes it possible to obtain different profiles of the corresponding crystallographic planes. The results of a study of the influence of technological errors on the geometric dimensions of sensitive elements are provided: the dependence of the value of the lateral undercut of silicon on the accuracy of the angular alignment of the mask with the crystallographic axis of the plate (100) was revealed. The design of the sensitive element of the micromechanical accelerometer has been developed. The performed simulations have proved out the performance of the structure, the calculations have shown the change in the scale factor in the temperature range from -60 to $+125$ °C, the value of the nominal capacity and capacity with a change in linear acceleration in the range of ± 60 g. In the manufacture of a sensitive element on the basis of the studies carried out, it is possible to obtain a lateral undercut of no more than 5 microns at a depth of anisotropic liquid chemical etching of 250 microns for KDB-0,01 plates with an orientation tolerance of ± 30 arc minutes or with a misorientation of the same magnitude allowed during exposure.

Keywords: MEMS, micromechanical accelerometer, sensing element, anisotropic liquid etching, experimental research results

For citation: Kochurina E. S., Anchutin S. A., Kalugin V. V., Zaryankin N. M., Timoshenkov A. S., Dernov I. S. Development of a sensitive element of a micromechanical accelerometer. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 59–67. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-59-67>

Введение. Микромеханические акселерометры (ММА) применяются для измерения проекции линейного ускорения на ось чувствительности, они могут использоваться в датчиках и приборах для определения скорости, вибрации, наклона объекта и т. д. Спектр областей применения данных датчиков широкий – от промышленности до робототехники, что обусловлено их низким энергопотреблением, малыми габаритами, небольшой массой, невысокой стоимостью при серийном производстве [1–4].

Цель настоящей работы – разработка и исследование чувствительного элемента (ЧЭ) ММА.

Описание конструкции и результаты моделирования чувствительного элемента ММА. ООО «Лаборатория Микроприборов» (г. Москва, Россия) совместно с Институтом нано- и микросистемной техники МИЭТ разработали ММА, ЧЭ которого схематично представлен на рис. 1.

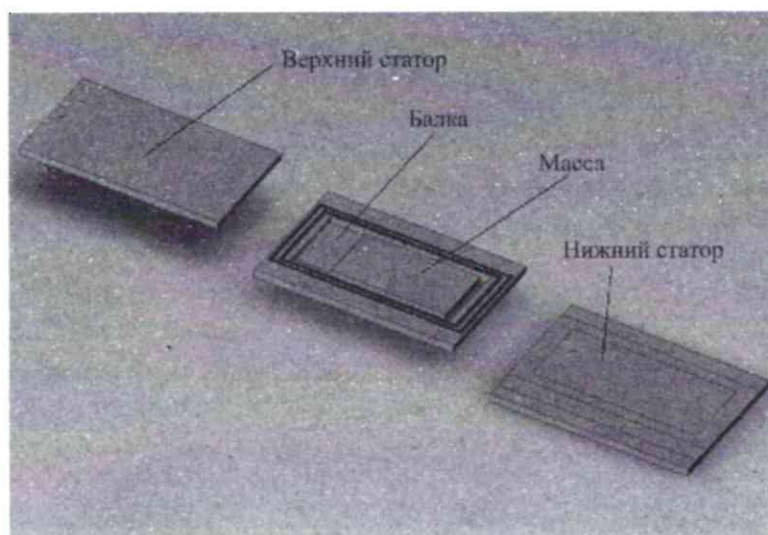


Рис. 1. Схематичное изображение ЧЭ ММА
Fig. 1. Schematic representation MMA sensing element

Инерциальная масса с помощью упругого подвеса (балки) подвешена к основанию. Под воздействием линейного ускорения за счет изгиба балки масса смещается относительно основания на величину, прямо пропорциональную проекции линейного ускорения на ось чувствительности акселерометра. В ЧЭ использована емкостная система съема сигнала: дифференциальная емкость – верхний статор – подвижная масса – нижний статор. Разницу сформированных емкостей в выходной цифровой код можно преобразовать, например, с помощью сигма-дельта-преобразователя.

Оценить работоспособность конструкции ЧЭ ММА можно на основе моделирования с использованием конечно-элементного анализа – численного метода решения задач с частными производными, а также интегральных уравнений. Область, в которой ищутся решения дифференциальных уравнений, разбивают на конечное количество подобластей (элементов). В каждом из элементов произвольно выбирают вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций, как правило, находят из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах). Эти коэффициенты выражают через значения функций в узлах элементов. Далее составляют систему линейных ал-

гебраических уравнений, количество которых равно количеству неизвестных значений в узлах, где ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями компьютера. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних элементов, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает ее решение [5–7].

Геометрия модели ЧЭ должна удовлетворять следующим требованиям:

- максимальное измеряемое линейное ускорение не менее $\pm 50 g$;
- дифференциальная емкость должна формироваться с учетом указанных ограничений и возможности изготовления (допуски на совмещение, погрешности травления, минимальный поясок для срачивания статоров и основания массы) и обеспечивать максимальный коэффициент преобразования линейного ускорения;
- изменение емкости не более $\pm 4,096$ пФ;
- внешние габаритные размеры элемента не более 8×8 мм.

Моделирование конструкции ЧЭ проведено при действии линейного ускорения в диапазоне $\pm 60 g$ (запас относительно исходных данных составляет не менее 20 %) [8, 9].

При моделировании выбраны следующие исходные данные: материал элемента – кремний; плотность 2328 кг/м^3 ; коэффициент Пуассона 0,28; модуль Юнга 169 ГПа. Параметры модели (использован метод конечных элементов): число узлов 96 656; число элементов 59 941.

Под воздействием линейного ускорения $60 g$ вдоль измерительной оси ЧЭ деформируется (рис. 2).

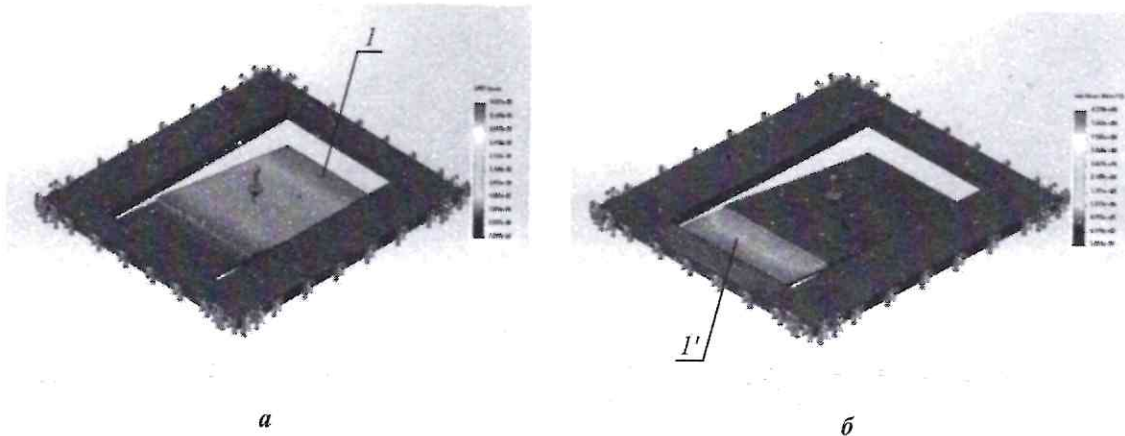


Рис. 2. Деформация элемента (а) и напряжение в материале элемента (б) при действии линейного ускорения $60 g$ (I, I' – соответственно максимальное и минимальное смещение или деформация)
Fig. 2. Deformation of the sensing element (a) and stresses in the sensing element material (b) under the action of linear acceleration $60 g$ (I, I' – maximum and minimum displacement or deformation respectively)

Расчетное максимальное напряжение в материале составило 4,378 МПа, максимальное перемещение кромки подвижной массы – 3,537 мкм. В результате проведенного модального анализа получены значения четырех собственных частот: 2527, 19 504, 38 533, 65 231 Гц. Минимальное значение резонансной частоты равно 2527 Гц. Это позволяет утверждать, что при действии внешних воздействий (вибрации) в диапазоне до 2000 Гц не будет возникать резонанс ЧЭ. Вторая собственная частота примерно в семь раз превышает значение первой собственной частоты.

Проведены предварительные расчеты основных характеристик ММА, который может быть собран на основе разработанного ЧЭ и сигма-дельта-преобразователя. Расчетное изменение масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °C показано на рис. 3.

При зазоре 13 мкм номинальная емкость составляет 10,64 пФ. При изменении линейного ускорения в диапазоне ± 60 g изменение емкости составляет $\pm 3,46$ пФ.

Особенности технологического процесса изготовления ММА. ММА изготовлены по МЭМС-технологии. Для получения

кремниевых элементов МЭМС используют процессы травления, которые условно можно разделить на две группы – жидкостные и газофазные (сухие). Жидкостные процессы основаны на химической реакции, поэтому они более изотропные, чем газофазные, имеют большую скорость травления и могут быть более селективными [9, 10]. В настоящей работе для изготовления ЧЭ применяется анизотропное жидкостное химическое травление (АЖХТ) кремния, которое позволяет получать различные профили соответствующих кристаллографических плоскостей. Профиль травления зависит от кристаллографической ориентации поверхности кристалла, от ориентации фотошаблона в плоскости пластины относительно основания базового среза, типа и состава травителя, условий травления и параметров пластины. Для АЖХТ кремния в качестве маскирующих покрытий используются слой нитрида кремния Si_3N_4 и слой оксида кремния SiO_2 . Низкая скорость травления кристаллографических плоскостей (111) обуславливает, как правило, высокое качество травления фигур, ограниченных этими плоскостями. Фактически в процессе АЖХТ кремния плоскости (111) выполняют функцию стоп-слоя. Вместе с тем неоптимальный выбор состава травителя и режимов травления может привести к дефектам. В то же время значительно сложнее получить высокое качество поверхности дна профиля (плоскость (100)). После глубокого травления (100 мкм и более) на изготовленных образцах могут появляться различные дефекты. Наиболее радикальный способ исключить дефекты – это проектирование конструкций кремниевых элементов на стадии разработки фигур травления, ограниченных плоскостями (111). Несмотря на простоту, скорость и селективность, процесс АЖХТ имеет ряд недостатков. Одна из существенных проблем при производстве МЭМС – слипание и разрушение свободностоящих структур вследствие действия сил поверхностного натяжения жидкости. Данные силы возникают при образовании капель раствора внутри полостей и зазоров структур после извлечения пластины из ванны. На воздухе капли высыхают и уменьшаются в объеме, в результате «слепляются» механические элементы структуры. В некоторых случаях деформационные напряжения могут быть настолько значительными, что происходит механическое повреждение отдельных элементов МЭМС. В предлагаемой конструкции предусмотрены размеры элементов и полостей, исключающие проявление недостатков АЖХТ.

Один из основных факторов, определяющих точностные характеристики ММА, – погрешность изготовления микромеханического элемента, проявляющаяся в отклонении линейных размеров от номинальных, перекосах, несимметричности элементов и т. п. [9]. Возникающие статические и динамические небалансы кремниевых элементов

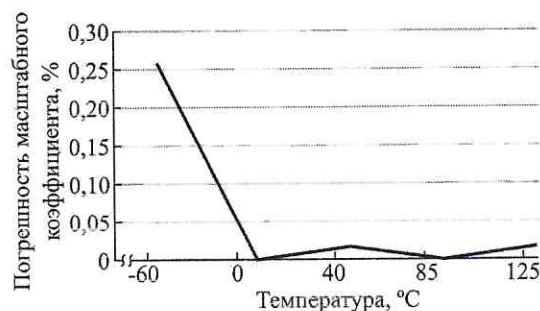


Рис. 3. Погрешность масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °C

Fig. 3. Scale factor accuracy over operating temperature range from -60 to $+125$ °C

приводят к появлению в микромеханических элементах погрешностей от перекрестных угловых и линейных ускорений. Перекосы изготовления микромеханических элементов вызывают паразитные колебания [9].

В ходе исследования влияния технологических погрешностей на форму ЧЭ выявлена зависимость бокового подтравки кремния от точности углового совмещения маски с кристаллографической осью пластины. Исследования проводили на экспериментальных пластинах КЭФ-4,5[100] и КДБ-0,01[100] диаметром 100 мм и толщиной 300 мкм. На них предварительно формировали маску из Si_3N_4 толщиной 0,13 мкм с подслоем SiO_2 толщиной 0,05 мкм. Эти пластины имеют достаточно жесткий допуск ($\pm 20'$) на отклонение базового среза от направления [100].

Для экспонирования разработан фотошаблон для контактной фотолитографии, содержащий шесть прямоугольных блоков топологии. В процессе первого экспонирования один из блоков засвечен при строгой ориентации относительно базового среза. При экспонировании каждого следующего блока пластину разворачивали относительно фотошаблона на разные заданные углы. Остальные блоки при этом были закрыты светонепроницаемым экраном. После формирования маски из Si_3N_4 проведено АЖХТ этих пластин в 30%-ном водном растворе КОН при температуре 95 °С. Глубина травления составила 240–250 мкм.

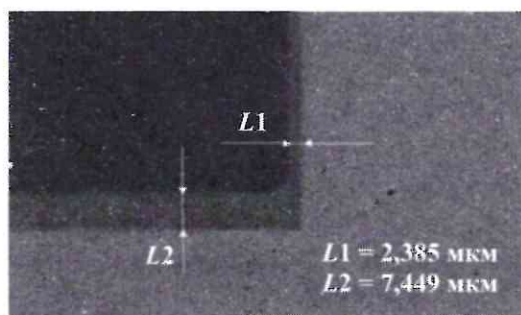


Рис. 4. Углубление прямоугольной формы (разориентация 18')

Fig. 4. Deepening is rectangular (misorientation 18 arc minutes)

Анализ результатов АЖХТ проведен с использованием оптического микроскопа при увеличении 100–500 крат. Как следует из полученных данных, в блоках, которые экспонировались при развороте пластины относительно фотошаблона, линии подтравки под маску имеют клиновидную форму. На рис. 4 показано углубление прямоугольной формы размером 940×1600 мкм в пластине КЭФ-4,5, которое экспонировалось при развороте блока на 18'. Величина подтравки меняется от 2,385 до 7,449 мкм. Для получения прямоугольной формы кремниевого элемента предполагается использование компенсаторов углов подтравки из материала маски.

Одинаковые симметричные фрагменты топологии, полученные при разной ориентации блоков в процессе экспонирования, показаны на рис. 5. Фрагмент, изображенный на рис. 5, а, проэкспонирован при строгой ориентации блока, а на рис. 5, б – при развороте на 18'. Размер подтравки после АЖХТ пластин КДБ-0,01 составил 7 мкм, т. е. по 3,5 мкм на сторону (см. рис. 5, а), и 9,6 мкм, т. е. в среднем 4,8 мкм на каждую сторону (см. рис. 5, б). Таким образом, разворот на 18' привел к увеличению бокового подтравки на 1,3 мкм на каждую сторону.

Как следует из рис. 5, б, в пластинах, обработанных АЖХТ, ориентация базового среза действительно строго совпадает с направлением кристаллографической оси, так как укладывается в допуск $\pm 20'$, указанный в паспорте. При строгой ориентации фотошаблона и пластины во время экспонирования величина бокового подтравки была ожидаемо минимальна и составила 2 мкм для пластин КЭФ-4,5 и 2,3–3,5 мкм для пластин КДБ-0,01. Разброс в величинах подтравки на пластине КДБ-0,01 объясняется, очевидно, наличием большего числа дефектов кристаллической решетки в сильнолегированном кремнии КДБ-0,01.

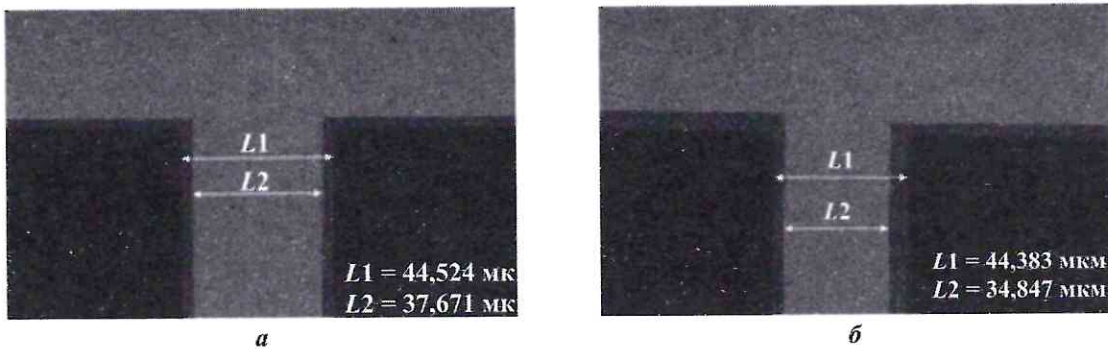


Рис. 5. Фрагмент топологии: а – строгая ориентация; б – разориентация на 18'
 Fig. 5. Fragment of the topology: a – strict orientation; b – misorientation 18 arc minutes

Аналогично проведено измерение бокового подтрав кремния под маску из Si_3N_4 на каждом из блоков топологии. Результаты измерений представлены на рис. 6.

Угловая разориентация при экспонировании приводит к увеличению подтрав. Но по результатам проведенных измерений можно сделать вывод, что заранее точно рассчитать увеличение подтрав при разориентации блоков сложно, даже если известны угол разориентации и размеры элементов топологии. При АЖХТ пластин КЭФ-4,5 и КДБ-0,01 величина подтрав может меняться от пластины к пластине в небольших пределах.

Закключение. Проведенное моделирование свидетельствует о работоспособности конструкции, расчеты показывают изменение масштабного коэффициента в диапазоне температур от -60 до $+125$ °С. Получена номинальная емкость, равная 10,64 пФ. При изменении линейного ускорения в диапазоне ± 60 g изменение емкости составляет $\pm 3,46$ пФ. При изготовлении ЧЭ на основе проведенных исследований можно получить боковой подтрав не более 5 мкм при глубине АЖХТ 250 мкм для пластин с допуском на ориентацию $\pm 20'$ или с такой же разориентацией, допущенной во время экспонирования. Таким образом, при строгой ориентации пластины относительно фотошаблона при экспонировании боковой подтрав минимален, но может колебаться в небольших пределах.

Материалы статьи доложены на 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2021» (3–9 февраля 2021 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакиеева А. Г. Микроэлектромеханические системы: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2016. 141 с.
2. Дюжев Н. А., Киреев В. Ю. Элементный базис нано- и микросистемной техники: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2019. 140 с.

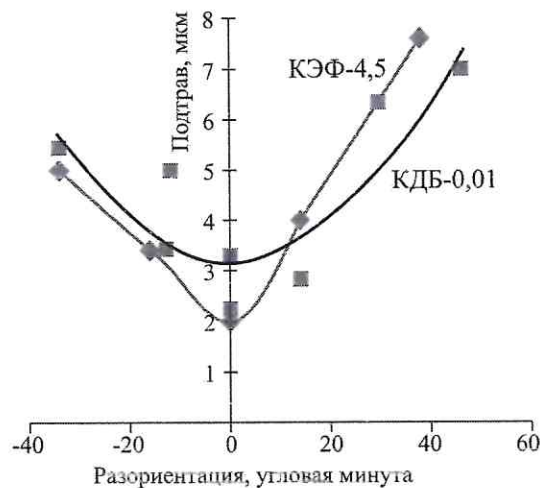


Рис. 6. Зависимость бокового подтрав от угловой разориентации блоков топологии относительно базового среза кремниевых пластин
 Fig. 6. Dependence of the lateral undercut on the angular misorientation of topology blocks relative to the base cut of silicon wafers

3. **Шерстобитова А. С.** Датчики физических величин: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 57 с.
4. **Тимошенков А. С.** Тенденции в развитии современных инерциальных микромеханических датчиков // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 579–581. doi: <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.579.581>
5. **Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А.** ANSYS в руках инженера: практ. рук. / предисл. А. С. Шадского. 4-е изд., стер. М.: URSS: ЛИБРОКОМ, 2015. 272 с.
6. **Морозов Е. М., Муйземек А. Ю., Шадский А. С.** ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. Изд. стер. М.: URSS: ЛЕНАНД, 2016. 456 с.
7. **Амеличев В. В., Григорьев Д. М., Резнев А. А.** Конечно-элементное моделирование мембранного модуля // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 3. С. 277–284. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-3-277-284>
8. **Тимошенков С. П., Калугин В. В., Анчутин С. А., Кочурина Е. С.** Разработка конструкции сенсора линейного ускорения // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: науч.-практ. конф.: сб. трудов. М.: МИЭТ, 2019. С. 151–156.
9. Проектирование и изготовление чувствительного элемента МЭМС-акселерометра / **С. П. Тимошенков, С. А. Анчутин, Н. М. Зарянкин и др.** // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 2. С. 63–67. doi: <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>
10. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review / **P. Pal, V. Swarnalatha, A. V. N. Rao et al.** // Micro and Nano Syst. Lett. 2021. Vol. 9. Art. No. 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s40486-021-00129-0>

Статья поступила в редакцию 25.05.2021 г.; одобрена после рецензирования 07.09.2021 г.; принята к публикации 21.12.2021 г.

Информация об авторах

Кочурина Елена Сергеевна – кандидат технических наук, главный метролог ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), инженер-конструктор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ekochurina@mp-lab.ru

Анчутин Степан Александрович – ведущий инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), step@mail.ru

Калугин Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), viktor118@mail.ru

Зарянкин Николай Михайлович – кандидат технических наук, ведущий инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), ведущий инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), n.zaryankin@mail.ru

Тимошенков Алексей Сергеевич – доктор технических наук, генеральный директор ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), at@mp-lab.ru

Дернов Илья Сергеевич – инженер ООО «Лаборатория микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), инженер Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), i.s.dernov@yandex.ru

References

1. Gurtov V. A., Belyaev M. A., Baksheeva A. G. *Microelectromechanical systems*. Petrozavodsk, Petrozavodsk State University Publ., 2016. 141 p. (In Russian).
2. Dyuzhev N. A., Kireev V. Yu. *Element basis of nano- and microsystem engineering*. Moscow, MIET Publ., 2019. 140 p. (In Russian).
3. Sherstobitova A. S. *Physical quantities' data units*. St. Petersburg, ITMO University, 2017. 57 p. (In Russian).
4. Timoshenkov A. S. Trends in modern inertial micromechanical sensors development. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2019, no. S (89), pp. 579–581. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.22184/NanoRus.2019.12.89.579.581>
5. Kaplun A. B., Morozov E. M., Olfer'yeva M. A. *ANSYS in hands of an engineer*. 4th ed., ster. Moscow, URSS, LIBROKOM, 2015. 272 p. (In Russian).
6. Morozov E. M., Muyzemnek A. Yu., Shadskiy A. S. *ANSYS in hands of an engineer: Fracture mechanics*. Ster. ed. Moscow, URSS, LENAND, 2016. 456 p. (In Russian).
7. Amelichev V. V., Grigoryev D. M., Reznov A. A. Finite element modeling of membrane module. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 277–284. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-3-277-284>
8. Timoshenkov S. P., Kalugin V. V., Anchutin S. A., Kochurina E. S. Sensor of linear acceleration development. *Intellektual'nye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika = Intelligent Systems and Microsystems Engineering, Research and Practice Conference Proceedings*. Moscow, MIET Publ., 2019, pp. 151–156. (In Russian).
9. Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Zarjankin N. M., Kalugin V. V., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S., Boev L. R. Research and development of MEMS accelerometer's sensor. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 63–67. (In Russian). doi: <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>
10. Pal P., Swarnalatha V., Rao A. V. N., Pandey A. K., Tanaka H., Sato K. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review. *Micro and Nano Syst. Lett.*, 2021, vol. 9, art. no. 4. doi: <https://doi.org/10.1186/s40486-021-00129-0>

The article was submitted 25.05.2021; approved after reviewing 07.09.2021;
accepted for publication 21.12.2021.

Information about the authors

Elena S. Kochurina – Cand. Sci. (Eng.), Chief Metrologist, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Design Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ekochurina@mp-lab.ru

Stepan A. Anchutin – Leading Engineer, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), step@mail.ru

Viktor V. Kalugin – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), viktor118@mail.ru

Nikolay M. Zaryankin – Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Leading Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), n.zaryankin@mail.ru

Alexey S. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), General Director, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), at@mp-lab.ru

Ilya S. Dernov – Engineer, “Laboratory of Micro-Devices” Ltd. (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), Engineer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), i.s.dernov@yandex.ru