

Расчет и моделирование основных параметров дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра

И.В. Годовицын¹, Д.А. Сайкин¹, Р.А. Федоров¹, В.В. Амеличев¹

¹ФГУ НПК «Технологический центр» МИЭТ, saikin84@yandex.ru

Аннотация — С помощью аналитических соотношений и конечно-элементного моделирования рассчитаны основные параметры тестовой структуры дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра. Разработана технология изготовления МЭМС-акселерометра с использованием КНИ-пластин и изготовлены экспериментальные образцы. Проведены измерения основных параметров МЭМС-акселерометра, продемонстрировавшие хорошее совпадение с расчетными величинами.

Ключевые слова - МЭМС, КНИ, акселерометр.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие, благодаря прогрессу в области полупроводникового производства, КНИ-пластины стали доступным материалом для разработки и изготовления МЭМС-преобразователей. Структура КНИ-пластины включает рабочий слой толщиной от десятков до сотен мкм, диэлектрический слой толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков мкм и подложку толщиной несколько сотен мкм. Основное достоинство КНИ-пластин заключается в возможности формирования в рабочем слое изолированных островков монокристаллического кремния, из-под которых потом диэлектрический (жертвенный) слой может быть частично или полностью удален. При этом, путем подбора геометрических размеров элементов и времени травления жертвенного слоя, могут быть одновременно сформированы жестко закрепленные, изолированные от подложки и механически подвижные элементы, т. е. вся структура МЭМС-преобразователя. Травление рабочего слоя толщиной несколько сотен микрон осуществляется с помощью процесса глубокого анизотропного плазмохимического травления (АПХТ), или Bosch-процесса, обеспечивающего воспроизводимое формирование элементов различной геометрии и близкие к вертикальным стенки структуры. Получающийся в результате МЭМС-преобразователь имеет достаточно большую массу и большую емкость, реализованную в виде встречно-штыревого конденсатора, и его механическая чувствительность значительно выше чувствительности преобразователей, сформированных с использованием обычных кремниевых пластин и традиционных планарных процессов.

Ведущие мировые фирмы-разработчики активно предлагают датчики с использованием МЭМС-преобразователей, изготовленных на КНИ-пластинах. Такие компании как Freescale Semiconductors [1], STMicroelectronics [2], VTI Technologies [3] в промышленных объемах выпускают акселерометры, гироскопы, датчики наклона и другие датчики. Датчики имеют конструкцию, совмещающую чувствительный элемент и кристалл с обрабатываемой схемой в одном малогабаритном, часто низкопрофильном корпусе, и находят целый спектр применений, начиная с управляющих систем автомобиля и заканчивая мобильными устройствами и электронными игрушками. Несмотря на то, что объемы поставок МЭМС-датчиков достигают сотен миллионов штук (например, только компания Freescale Semiconductors с 1980 года уже поставила более 1 млрд. МЭМС-датчиков [4]), потребность в них постоянно растет. В связи с этим, особенно актуальным и востребованным является проведение российских разработок в области МЭМС-датчиков и МЭМС-преобразователей с использованием в качестве материала КНИ-пластин.

II. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

Упрощенно конструкция дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра представляет собой конденсатор с тремя обкладками, две из которых зафиксированы, а одна является подвижной. На рис. 1 обкладки 1 и 3 являются неподвижными, а обкладка 2 может перемещаться по вертикали. При этом одна емкость будет увеличиваться (например C1), а другая (C2) будет уменьшаться.

Модификацией такой конструкции является встречно-штыревое расположение электродов обкладок. На рис. 2 представлена схема конструкции дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра со встречно-штыревым расположением электродов. Подвижные электроды располагаются на инерционной массе, которая крепится к кристаллу с помощью упругих подвесов. Неподвижные электроды располагаются справа и слева от подвижных электродов.

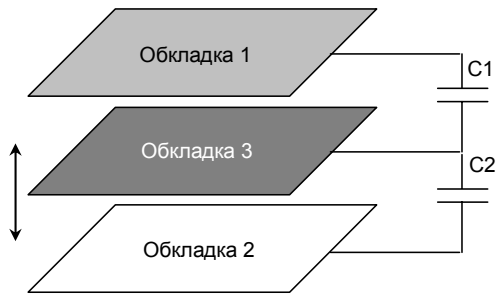


Рис. 1. Конструкция плоско-параллельного дифференциального конденсатора

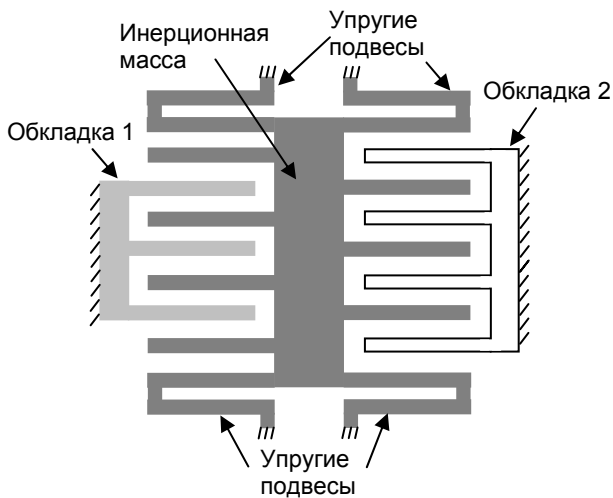


Рис. 2. Конструкция дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра

Основными параметрами, которые необходимо рассчитывать при разработке МЭМС-акселерометра, являются площадь и емкость обкладок, инерционная масса, собственная частота, коэффициент демпфирования, напряжение притягивания.

Площадь обкладок и инерционную массу можно рассчитать из геометрических размеров структуры, а емкость обкладок – используя формулу для плоскопараллельного конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где ε – проницаемость среды, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, d – расстояние между зубьями.

Наряду с этими параметрами, характеристики МЭМС-акселерометра (собственная частота, коэффициент демпфирования) также могут быть рассчитаны с использованием простых аналитических соотношений, однако для этого необходимо знать коэффициент упругости подвеса.

Упругие подвесы могут быть прямыми и складчатыми, схематичное изображение обоих типов подвесов приведено на рис. 3.

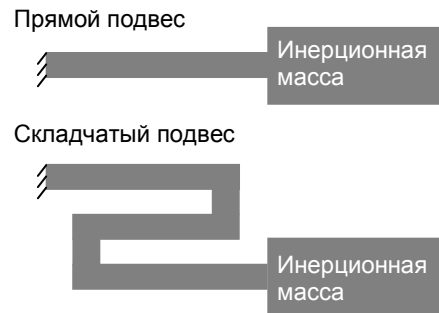


Рис. 3. Возможная форма упругих подвесов

Выбор геометрии упругого подвеса во многом определяется ограничениями топологии и технологических процессов. Для получения высокой чувствительности и небольших размеров подвеса необходимо уменьшать его ширину, однако уменьшение ширины приводит к тому, что на характеристики подвеса существенное влияние начинает оказывать воспроизводимость технологического процесса (например, АПХТ кремния). Увеличение ширины подвеса, для снижения чувствительности к отклонениям технологического процесса, приводит к необходимости увеличения его длины, что увеличивает размер кристалла. В качестве компромисса, может использоваться складчатый подвес (folded beam, serpentine beam). В данной работе рассматривался подвес складчатого типа, как дающий возможность уменьшения размеров кристалла МЭМС-акселерометра.

Расчет коэффициента упругости с помощью точных аналитических соотношений возможен для простых форм подвеса. Для сложных используются приближенные выражения. В частности, коэффициент упругости складчатого подвеса, изображенного на рис.4, в первом приближении, может быть рассчитан с помощью следующей формулы [5]:

$$K = \frac{12EI}{(2N + 3)l^3} = \frac{Etw^3}{(2N + 3)l^3}$$

где E – модуль упругости материала подвеса, I – момент инерции сечения подвеса, t – толщина подвеса, w – ширина подвеса, N – число складок подвеса, l – длина сегмента складчатого подвеса. При следующих параметрах подвеса: $E=169 \cdot 10^3$ МПа, $t=30$ мкм, $w=5$ мкм, $N=2$, $l=180$ мкм, расчетная величина коэффициента упругости составляет 16 Н/м, а суммарная величина для четырех подвесов - 64 Н/м.

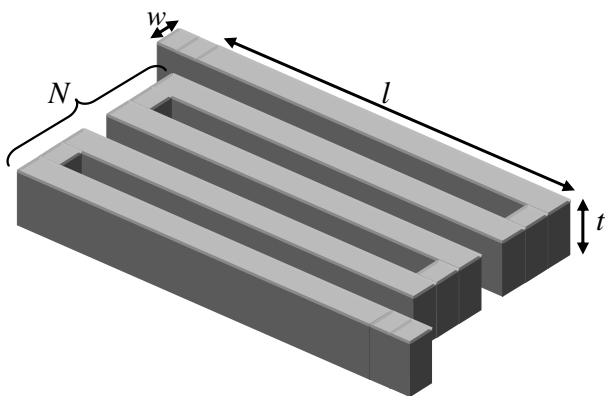
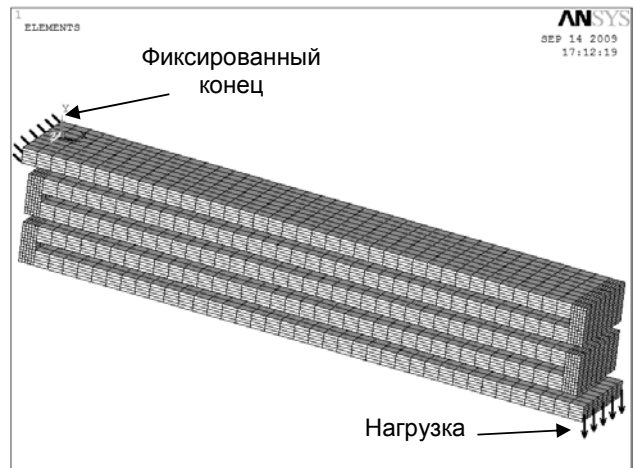


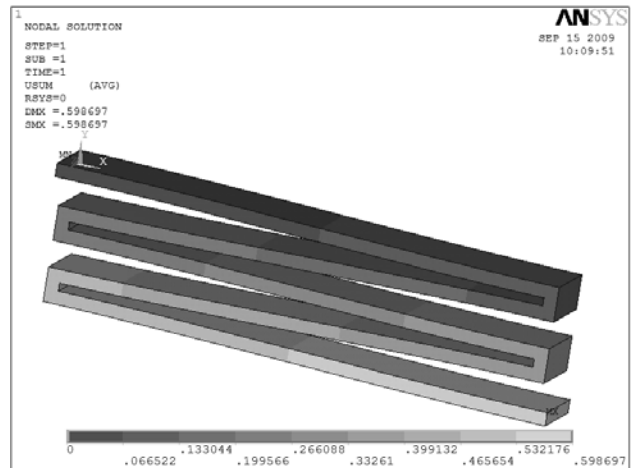
Рис. 4. Схематичное изображение складчатого подвеса, используемого в данной работе

Для получения более точного значения коэффициента упругости подвеса сложной формы, в частности, складчатого подвеса, оптимальным представляется использование конечно-элементного моделирования. В данной работе моделирование подвеса проводилось с помощью программы ANSYS. Была создана конечно-элементная модель подвеса, описывающая упругий элемент. Разбиение производилось элементом Solid45, предназначенным для решения задач упругих деформаций. Модель подвеса и сетка конечных элементов приведены на рисунке 5. Поскольку короткие сегменты подвеса являются областями наибольших деформаций, размер элементов в них был уменьшен. В области, обозначенной штрихами, было задано граничное условие, запрещающее любые перемещения (фиксированный конец), а на другом конце подвеса были заданы: граничное условие, запрещающее перемещение вдоль оси X, и нагрузка по оси Y. Результаты расчета деформации подвеса приведены на рис. 5б. Величина воздействия была равна 10 мкН, перемещение конца упругого элемента составило 0,6 мкм. На основании данных конечно-элементного моделирования, был вычислен коэффициент упругости подвеса, равный 16,7 Н/м, что дает суммарный коэффициент упругости равный 66,7 Н/м для всех четырех подвесов. Относительно аналитически рассчитанной величины погрешность составляет 4%.

Коэффициент упругости подвеса позволяет рассчитать такие важные характеристики МЭМС-акселерометра как собственная частота, а также абсолютный коэффициент демпфирования и относительный коэффициент демпфирования.



а)



б)

а – модель упругого подвеса

б – результат расчета деформации под нагрузкой

Рис. 5. Модель упругого подвеса и результат расчета деформации под нагрузкой

Собственная частота рассчитывалась по следующей формуле:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}},$$

где k – коэффициент упругости подвеса, M – эффективная масса. Абсолютный и относительный коэффициенты демпфирования рассчитывались на основе допущения об упругих свойствах тонкого воздушного слоя, заключенного между зубьями МЭМС-акселерометра, по следующим формулам [6],[7]:

Таблица 1

Основные расчетные параметры тестовой структуры МЭМС-акселерометра

Параметр	Величина
Толщина рабочего слоя (высота структуры МЭМС-акселерометра), мкм	30
Величина воздушного зазора между зубьями, мкм	3,0
Инерционная масса, кг	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Площадь обкладки, м ²	$2,3 \cdot 10^{-7}$
Емкость обкладки, пФ	0,58
Коэффициент упругости подвеса, Н/м	66,7
Собственная частота, кГц	9,9
Абсолютный коэффициент демпфирования, кг/с	$8,7 \cdot 10^{-5}$
Относительный коэффициент демпфирования	0,04
Напряжение притягивания, В	20

$$b = n\mu \frac{h^3 l}{d^3},$$

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}},$$

где n – количество пар зубьев встречно-штыревого конденсатора, μ – вязкость воздуха, h – высота зубьев, l – длина зубьев, d – расстояние между зубьями.

Основные геометрические и расчетные параметры изготовленной тестовой структуры МЭМС-акселерометра приведены в таблице 1. Из таблицы 1 можно видеть, что тестовая структура МЭМС-акселерометра имеет относительный коэффициент демпфирования равный 0,04. Эта величина существенно ниже величины 0,65, которая считается величиной критического демпфирования и обеспечивает наилучшие динамические характеристики МЭМС-акселерометра [8]. Таким образом, изготовленная тестовая структура МЭМС-акселерометра является недостаточно демпфированной и для улучшения динамических характеристик необходимо рассматривать пути увеличения демпфирования.

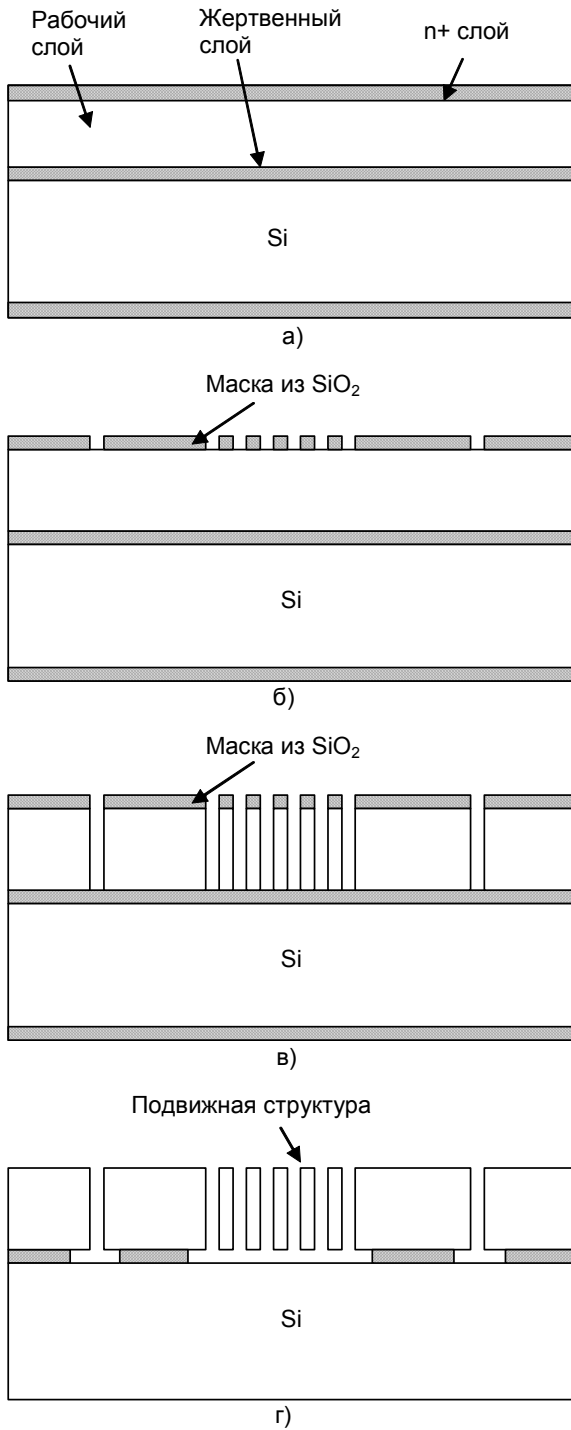
В таблице 1 также приводится расчетное значение величины напряжения притягивания, т.е. напряжения, при котором подвижная обкладка притягивается к неподвижной. В случае плоской модели, напряжение притягивания рассчитывается по следующей формуле:

$$V_p = \sqrt{\frac{8d^3 k}{27\epsilon_0 S}}$$

где S – площадь обкладки, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

III. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ МЭМС-АКСЕЛЕРОМЕТРА

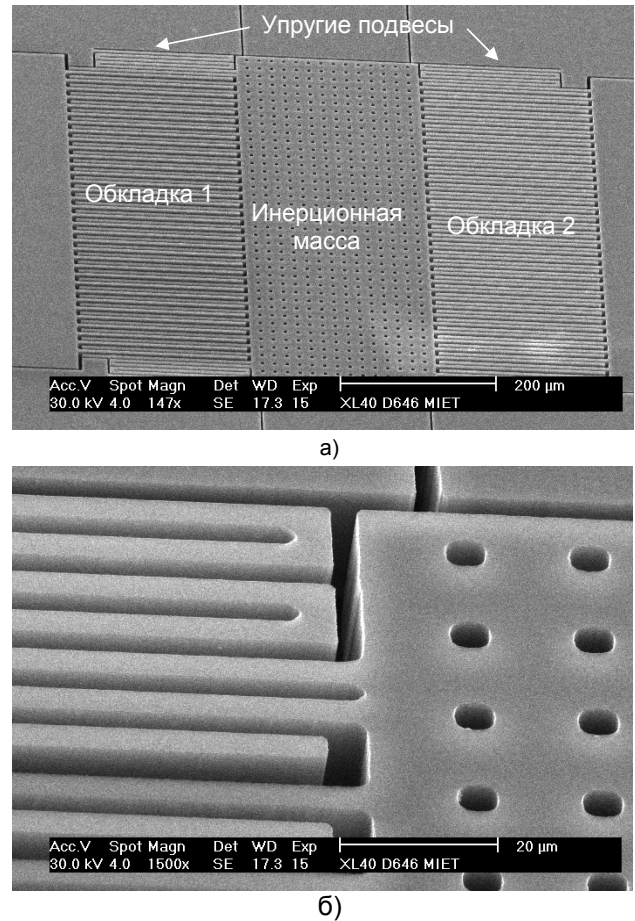
Основные этапы изготовления МЭМС-преобразователя с использованием КНИ-пластины приведены на рис. 6. Обработка КНИ-пластины началась с диффузии фосфора с целью снижения сопротивления структуры преобразователя. В результате на поверхности рабочего слоя формировался p+-слой с сопротивлением 8-10 Ом/кв – рис. 6а. Далее проводилось термическое окисление пластины на толщину 0,8-0,9 мкм. Данный термический окисел предназначен для использования в качестве маски при АПХТ кремния. С помощью фотолитографии формировался рисунок структуры преобразователя и проводилось плазмохимическое травление SiO₂ – рис. 6б. Затем проводилось анизотропное плазмохимическое травление кремния на глубину 30 мкм. Стоп-слоем при травлении служил жертвенный слой толщиной 5 мкм, обеспечивавший формирование элементов разной геометрии – рис. 6в. На заключительном этапе изготовления проводилось травление жертвенного слоя; в качестве травителя использовался раствор концентрированной плавиковой кислоты (HF) [9],[10]. Время травления подбиралось в зависимости от планарного размера подвижного элемента, т.е. травление должно было обеспечить подвижность элемента с максимальной шириной [11],[12]. В результате травления жертвенного слоя структура преобразователя становилась механически подвижной и одновременно удалялся слой SiO₂, служивший маской при АПХТ кремния – рис. 6г.



- а – диффузия фосфора и формирование n+ слоя
- б – термическое окисление и формирование рисунка в SiO₂
- в – анизотропное плазмо-химическое травление кремния
- г – жидкостное травление жертвенного слоя SiO₂

Рис. 6. Основные технологические этапы изготовления МЭМС-преобразователя на КНИ-пластине

На рис. 7 приведены микрофотографии тестовой структуры МЭМС-акселерометра, изготовленного по разработанной технологии. Тестовая структура МЭМС-акселерометра имеет инерционную массу, закрепленную на 4 подвесах, и две обкладки, образующие дифференциальный конденсатор.



- а – общий вид тестовой структуры акселерометра
- б – фрагмент тестовой структуры акселерометра

Рис. 7. Тестовая структура МЭМС-акселерометра, изготовленная на КНИ-пластине

Напряжение притягивания, расчет которого приведен выше, является интегральным параметром МЭМС-акселерометра, на который непосредственно влияют параметры ключевых элементов структуры – коэффициент упругости подвеса (т.е. геометрия подвеса), площадь обкладок, расстояние между обкладками. Измерение напряжения притягивания дает информацию о том, правильно ли были проведены расчеты тестовой структуры МЭМС-акселерометра. Измерение напряжения притягивания изготовленной тестовой структуры МЭМС-акселерометра, проведенное с использованием прибора наблюдения характеристик транзисторов Л2-56 показало, что его вели-

чина составляет 18-19 В. Данная величина хорошо согласуется с расчетными данными, если принимать во внимание технологическое изменение линейных размеров тестовой структуры МЭМС-акселерометра при АПХТ кремния.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработана технология изготовления МЭМС-преобразователей ускорения на КНИ-пластинах. В качестве исходного материала использовались КНИ-пластины с толщиной рабочего слоя 30 мкм и разделительного диэлектрика 5 мкм. Процесс изготовления тестовой структуры дифференциально-емкостного МЭМС-акселерометра включает одну операцию фотолитографии, глубокое анизотропное плазмохимическое травление кремния и травление жертвенного слоя. При изготовлении тестовой структуры МЭМС-акселерометра наблюдалось прилипание структур к подложке, которое устранялось путем воздействия зондового манипулятора на подвижную обкладку.

Был проведен расчет основных параметров тестовой структуры дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра. Параметры, определяемые геометрическими размерами (площадь, емкость обкладок и величина инерционной массы), были рассчитаны с использованием аналитических соотношений для плоскопараллельного конденсатора. Коэффициент упругости подвеса, был в первом приближении, рассчитан с помощью аналитических выражений, а затем его значение было уточнено с помощью конечно-элементного моделирования в среде ANSYS. С использованием результатов конечно-элементного моделирования были рассчитаны собственная частота и абсолютный и относительный коэффициенты демпфирования тестовой структуры МЭМС-акселерометра. Результаты расчета относительного коэффициента демпфирования показали, что тестовая структура МЭМС-акселерометра недостаточно демпфирована, т.е. значение коэффициента существенно меньше 0,65. Также был проведен расчет напряжения притягивания, которое является интегральным параметром МЭМС-акселерометра, зависящем от ключевых элементов структуры – коэффициента упругости подвеса (т.е. геометрии подвеса), площади обкладок, расстояния между обкладками.

С использованием прибора наблюдения характеристик транзисторов Л2-56, были проведены измерения напряжения притягивания изготовленной тестовой структуры МЭМС-акселерометра. Величина напряжения притягивания составила 18-19 В, что хорошо согласуется с расчетной величиной, равной 20 В, с учетом технологических изменений линейных размеров структуры в процессе изготовления.

Работа выполнялась при частичном финансировании из средств гранта Президента РФ для государственной поддержки российских молодых ученых МК-826.2009.8.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dixon-Warren St.J. Chipworks Looks Inside the Freescale HARMEMS Process [Chipworks]. URL: <http://memsblog.wordpress.com/2009/08/03/chipworks-looks-inside-the-freescale-harmems-process> (дата обращения: 12.04.2010).
- [2] Piveteau L.D. Tiny Pump, Big Promise [Advanced Substrate News no.12, 2009]. URL: http://www.advancedsubstratenews.com/index.php?newsletter=4&nomRubrique=END_USER-APPS&rubrique=74 (дата обращения: 12.04.2010).
- [3] Kuisma H. 3D MEMS - technology for the future available today [VTI Technologies eNews]. URL: <http://www.vti.fi/en/news-events/enews/1-2007-enews/3d-mems> (дата обращения: 12.04.2010).
- [4] Freescale Sensor Product Fact Sheet URL: http://media.corporate-ir.net/media_files/IROL/19/196520/AUT-16654%201%20Billion%20Sensor%20Timeline%20NEW_HR%206-12-09.jpg (дата обращения: 12.04.2010).
- [5] Analysis, simulation and relative performances of two kinds of serpentine springs / Giuseppe Barillaro, Antonio Molfese, Andrea Nannini, Francesco Pieri // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2005. Vol. 15. No. 4. P. 736-746.
- [6] Airbag application: a microsystem including a silicon capacitive accelerometer, CMOS switched capacitor electronics and true self-test capability / L. Zimmermann, J. Ph. Ebersohl, F. Le Hung, J. P. Berry, F. Baillieu, P. Rey, B. Diem, S. Renard, P. Caillat // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1995. Vol. 46. Iss. 1-3. P. 190-195.
- [7] Mohamed Gad-el-Hak. *The MEMS handbook*. CRC Press, 2002. 1368 p.
- [8] Application of electrostatic feedback to critical damping of an integrated silicon capacitive accelerometer / R.P. van Kampen, M.J. Vellekoop, P.M. Sarro, R.F. Wolfenbuttel // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1994. Vol. 43. Iss. 1-3. P. 100-106.
- [9] Core T.A., Tsang W.K., Sherman S.J. Fabrication Technology for an Integrated Surface-Micromachined Sensor, *Solid State Technology*. 1993. Vol. 36. No. 10. P. 39-47.
- [10] The application of fine-grained, tensile polysilicon to mechanically resonant transducers / H. Guckel, S. Siegowski, T. Christenson, F. Raissi // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1990. Vol. 21. Iss. 1-3. P. 364-351.
- [11] Stiction in surface micromachining / Niels Tas, Tonny Sonnenberg, Henri Jansen, Rob Legtenberg, Miko Elwenspoek // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 1996. Vol. 6. No. 4. P. 385-397.
- [12] Maubodian R., Howe R.T. Critical Review: Adhesion in surface micromechanical structures, *Journal of Vacuum Science and Technology B*. 1997. Vol. 15. Iss. 1. P. 1-20.