

26. Geller S. Crystal structure of the solid electrolyte: RbAg_4I_5 // Science. 1967. V. 157. P. 310.
27. Bradley J. N., Greene P. D. Solids with high conductivity in group I halide systems // Trans. Faraday Soc. 1967. V. 63. P. 424.
28. Волков А. А., Козлов Г. В., Мирзоев Г. И., Гоффман В. Г. Субмиллиметровые колебательные спектры суперионного проводника RbAg_4I_5 // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. С. 182.
29. Di Salvo F. J. New and artificially structured electronic and magnetic materials // Advancing materials research. National Academy of Engineering and National Academy of Sciences, National Materials Advisory Board and Solid State Sciences Committee, National Research Council, P. A. Psaras, H. D. Langford, editors (1987); www.nap.edu/html/materials_and_man/0309036976/HTML/161-176.HTML/
30. Иванов-Шип А. К., Мури И. В. Ионика твердого тела. Т. 1. С.-Петербург: СПбГУ, 2000.
31. Jamnik J., Maier J. Defect chemistry and chemical transport involving interfaces // Solid State Ionics. 1999. V. 119. P. 191.
32. Despotuli A. L., Nikolaichik V. I. A step towards nanoionics // Solid State Ionics. 1993. V. 60. P. 275.
33. Nikolaichik V. I., Despotuli A. L. Electron beam writing in thin film of highly conducting solid electrolytes RbAg_4I_5 and $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$ // Phys. Mag. Lett. 1993. V. 67. P. 19.
34. Despotuli A. I., Shestakov A. A., Lichkova N. V. An external electric field effect in electron-beam lithography of RbAg_4I_5 solid electrolyte film // Solid State Ionics. 1994. V. 70/71. P. 130.
35. Ahn J., Rabalais J. W. Composition and structure of the Al_2O_3 (0001)-(1 × 1) surface // Surf. Sci. Rep. 1997. V. 388. P. 121.
36. Sutton A. P., Baluffi R. W. Interfaces in crystalline materials // Clarendon Press, Oxford, 1995. 819 P.
37. Деспотули А. Л., Личкова Н. В., Миненкова Н. А., Носенко С. В. Получение и некоторые свойства тонких пленок твердых электролитов $\text{CsAg}_4\text{Br}_3 - x\text{I}_2 + x$ и RbAg_4I_5 // Электрохимия. 1990. Т. 26. С. 1524.
38. Kiguchi M., Inoue H., Sasaki T. et al. Electronic structure of alkali halide-metal interface: $\text{LiCl}(001)/\text{Cu}(001)$ // Surf. Sci. 2003. V. 522. P. 84.
39. Friedel J. Dislocations and walls in crystals // NATO ASI, ed. R. Balian, M. Kleman, J.-P. Poirier, 1981, P. 5.
40. Шубников А. В., Копчик В. А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 340 с.
41. Андреева А. В. Симметрия структуры и ее проявление в свойствах гомо- и гетерофазных границ раздела кристаллов // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1987. 73 с.
42. Андреева А. В. Симметрия межкристаллитных границ: приложение к задачам гетероэпитаксии // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 46. С. 117.
43. Андреева А. В., Фирсова А. А. Симметрия межкристаллитных границ: алгоритмы, программы, таблицы // Препринт ИПТМ АН СССР, Черноголовка, 1990. 44 с.
44. Andreeva A. V. The interface symmetry and heteroepitaxy // Material Science Forum. 1991. V. 69. P. 111.
45. Andreeva A. V., Meiler D. L. The interface symmetry and epitaxy in Ni/GaAs system // Crystal properties and preparation. 1991. V. 35–38. P. 358.
46. Andreeva A. V., Talijan N. M., Milutinovic A. et al. Interface design of high coercive sintered permanent magnets of the SmCo_5 -Type // <http://preprint.chemweb.com/CPS/>, inorgchem/0302001 (2003).
47. Bredikhin S., Hattory T., Ishigame M. Schottky barriers and their properties in superionic crystals // Phys. Rev. B. 1994. V. 50. P. 2444.
48. Гохштейн А. Я. Электролиз и поверхностные явления // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. С. 779.
49. Деспотули А. Л., Личкова Н. В. Конденсатор с двойным электрическим слоем // Патент РФ. № 2004024.
50. Деспотули А. Л., Личкова Н. В. Ионистор // Патент РФ. № 2012105.
51. Личкова Н. В., Деспотули А. Л., Загороднев В. Н., Миненкова Н. А. Твердый электролит // Авт. свид. СССР № 1697573.
52. Личкова Н. В., Деспотули А. Л., Загороднев В. Н. и др. Ионная проводимость твердых электролитов двух- и трехкомпонентных $\text{AgX}-\text{CsX}$ ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) стеклообразующих систем // Электрохимия. 1989. Т. 25. С. 1636.
53. Kamigawa H., Kishimoto Y., Kojima Y. et al. Solid electrolyte capacitor, and process and apparatus for producing same // Patent US. N 6362950.
54. Taketani Y., Yoshida K., Kamigawa H. et al. Solid electrolyte capacitor // Patent US. N 6313979.
55. Лачинов А. Н., Корнилов В. М. Электронная природа модификации поверхности в системе $\text{Si}-\text{SiO}_2$ // Микросистемная техника. 2003. № 4. С. 11–14.
56. Hass K. C., Schneider W. F., Curioni A., Andreoni W. The chemistry of water on alumina surface: Reaction dynamics from first principles // Science. 1998. V. 282. P. 265.

Продолжение статьи читайте в следующем номере.

УДК 53.087.92

С. А. Козин,
НИИФИ, г. Пенза

ТЕХНОЛОГИЯ МЭМС В РАЗРАБОТКАХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Описаны интегральные датчики механических параметров, разработанные в Научно-исследовательском институте физических измерений (г. Пенза).

Научно-исследовательский институт физических измерений (НИИФИ) был основан в 1960 г. и является головным предприятием Российского авиационно-космического агентства, специализирующимся на разработке и поставке датчиков фи-

зических величин, промежуточных преобразователей и информационно-измерительных систем на их основе.

С середины 70-х годов прошлого века НИИФИ занимается разработкой полупроводниковых датчиков механических параметров для ракетно-космической техники и общепромышленного применения. В основе разработок заложены конструктивно-технологические решения (КТР) объемных микроэлектромеханических структур (МЭМС).

Типы интегральных датчиков по технологии МЭМС представлены в таблице.

Разработаны и освоены следующие базовые решения различных типов датчиков.

Датчики избыточного давления пьезорезисторные. В основе чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-060 находится круглый плоский кремниевый кристалл, содержащий интегральные тензорезисторы мостовой схемы, и невоспринимаю-

МЭМС-датчики	Типы датчиков	Диапазоны измерений	Габаритные размеры, масса
Избыточного давления пьезорезисторные	ДДЭ-060, ДДЭ-073, ДДЭ-082, ДДЭ-084, ДДЭ-096, ДДЭ-097, ДДЭ-114, ДДЭ-090, ДХП-096	0,01...300 МПа	Ø3,5...36 мм 5...130 г
Абсолютного давления пьезорезисторные	ДАЭ-099, ДАЭ-100	0,01...1 МПа	Ø16 мм 20...50 г
Абсолютного давления емкостные	ЧЭЭ-024.001	0,05...1 МПа	5×5 мм
Линейного ускорения пьезорезисторные	АЛЭ-037, АВЭ-001, АВЭ-002	$\pm(1000...100\ 000)$ м/с ²	24×24×8 мм 100 г
Линейного ускорения емкостные	АЛЕ-049, АЛЕ-050	$\pm(5,6...1200)$ м/с ²	35×35×22 мм 75 г
Угловой скорости (гироскоп) емкостные (МКС)	МВГ-11.039	100...1000 °/с	5×10 мм 5 г
Частоты вращения гальваномагнитные на магнитодиоде	Вг 1855, ОМ005	60...40 000 об/мин	Ø12 мм 100 г
Деформации пьезорезисторные	ЕВ	± 3000 мкм/м	5×5×0,05 мм

ций давление терморезистор схемы компенсации ухода чувствительности. Кристалл сформирован по планарной технологии и закреплен в металлическом корпусе с помощью ситаллоцемента.

По аналогичному решению созданы датчики для измерения давления до 300 МПа.

В основе датчика типа ДДЭ-097 находится двухслойный кремнево-стеклянный элемент, сформированный анодным соединением, который закреплен в керамическом внутреннем корпусе и натянут на металлическую мембрану.

Микромеханическая структура чувствительного элемента датчика типа ДДЭ-082 представляет собой кремнево-стеклянный узел, в котором стеклянный "тюльпан" с вплавленной металлической трубкой анодной посадкой герметично соединен с планарной поверхностью кристалла через адгезионное кольцо из поликристаллического кремния, нанесенного на кристалл поверх высоколегированных коммутационных шин из p^+ -кремния, соединяющих тензорезисторы, которые расположены на мембране, и контактные площадки, находящиеся на периферии кристалла (рис. 1).

Отличительной особенностью датчика типа ДХП-096 является его миниатюрность (диаметр

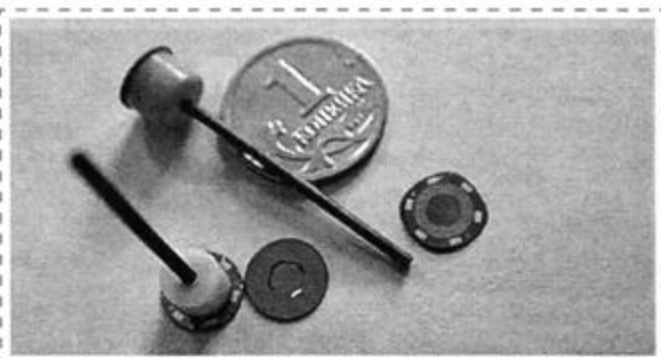


Рис. 1. Чувствительный элемент датчика ДДЭ-082

воспринимающей давление части 3,5 мм). Чувствительный элемент (ЧЭ) содержит профилированный кремниевый кристалл толщиной 100 мкм и Ø 2,5 мм с элементами жесткости на мембране, соединенный анодной посадкой со стеклянной бусой.

Основные этапы технологии кристалла датчика типа ДХП-096:

- формирование травлением профилированной заготовки (пластины кремния с утопленной до 100 мкм центральной частью);
- формирование анизотропным щелочным травлением профиля мембраны кристалла;
- формирование поэтапным ионным и диффузионным легированием термо- и тензорезисторов схемы;
- плазмохимическое травление кремния во фторсодержащей среде до разделения пластин на круглые кристаллы при защите металлическими масками.

Датчики абсолютного давления пьезорезисторные. В основе датчиков типа ДАЭ-100 находятся чувствительные элементы следующей структуры: профилированный кристалл, соединенный со стеклянной основой с образованием герметичной вакуумированной полости опорного давления (рис. 2).

Технология изготовления чувствительного элемента датчика абсолютного давления предусматривает групповое анодное соединение профилирован-

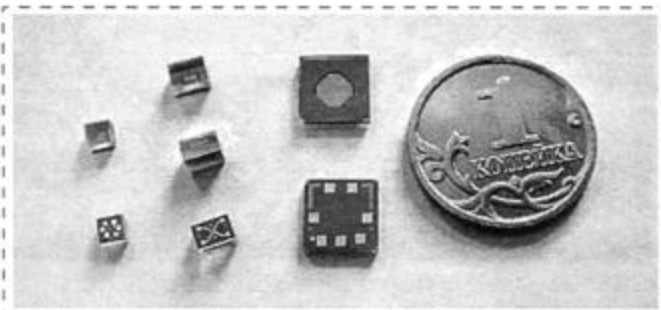
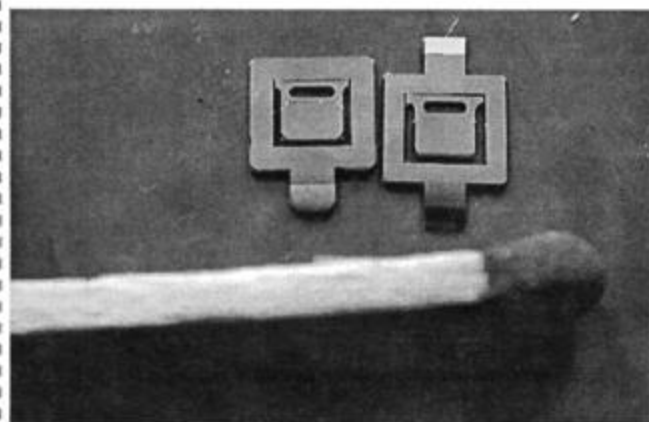
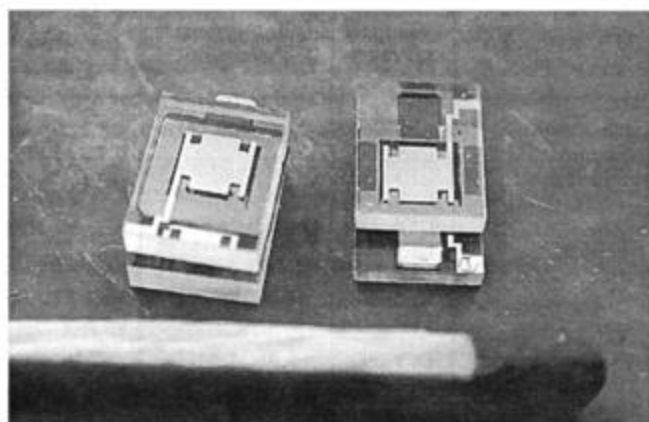


Рис. 2. Чувствительный элемент датчика ДАЭ-100



а)



б)

Рис. 3. Кремниевое-стеклянный элемент акселерометра АЛЕ-049

ной кремниевой и стеклянной пластин в вакууме с последующим разделением дисковой резкой. Благодаря использованию групповой технологии удалось достичь минимальных размеров (до 2×2 мм). За счет формирования контактов ЧЭ после создания вакуумированной полости возможно производство очень дешевых модулей абсолютного давления со столбиковыми выводами из припоя.

Датчики абсолютного давления емкостные. Особенности формирования микромеханической структуры модуля абсолютного давления емкостного типа являются: формирование групповой технологией на несущей стеклянной пластине сквозных отверстий; анодное присоединение к данной пластине рельефной кремниевой пластины; стравливание нерельефной части пластины до образования нижних емкостных обкладок; анодное присоединение в вакууме профилированной кремниевой пластины с верхними емкостными обкладками к несущей стеклянной пластине; разделение структуры на

отдельные модули; присоединение выводов к верхней обкладке и через отверстие в стекле к нижней обкладке.

Акселерометр линейных ускорений емкостной. Основные этапы технологии структуры кремниво-стеклянного элемента акселерометра типа АЛЕ-049 (рис. 3, а, б):

- формирование двусторонним размерным травлением трехрельефной структуры кристалла (с зазором 5 мкм);
- формирование металлизированных стеклянных плат;
- анодное соединение пакета ЧЭ.

Акселерометр линейных ускорений пьезорезисторный. Особенностью ЧЭ акселерометра типа АВЭ-002 является наличие двухуровневых консолей, удерживающих инерционную массу. В остальных конструктивно-технологических решениях аналогичны емкостному ЧЭ (рис. 4).

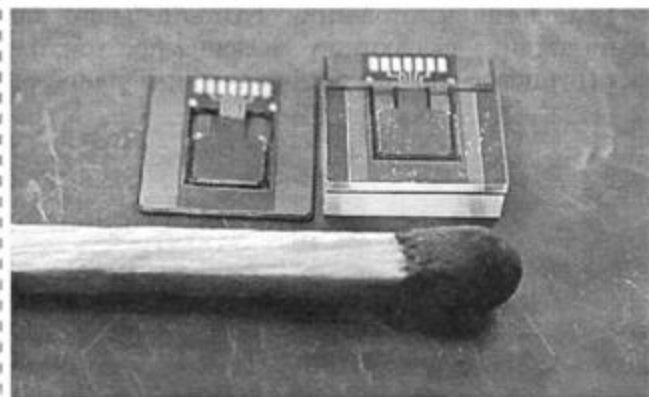


Рис. 4. Пьезорезисторный акселерометр линейных ускорений АВЭ-002

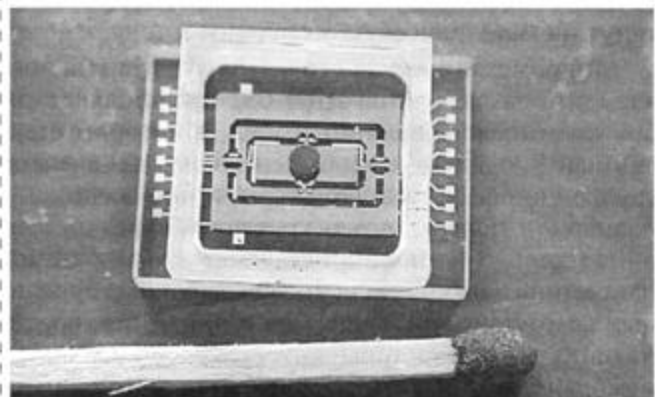


Рис. 5. Микроколебательная система датчика угловой скорости

Датчик угловой скорости (гироскоп). Работы по данному направлению находятся в развитии. На основе имеющегося технологического задела удалось освоить формирование требуемой конфигурации микроколебательной системы (МКС) (рис. 5).

МКС содержит следующие элементы:

- инерциальную механическую плату чувствительного элемента (ЧЭ), выполненного размерным травлением из монокристаллического кремния и содержащего две подвижные, подвешенные на консолях платы, которые являются обкладками емкостных датчиков силы и положения. Для повышения чувствительности центральная плата содержит двусторонний вольфрамовый груз, присоединенный к кремнию диффузионной сваркой;
- стеклянную плату-основание, содержащую выполненные по технологии напыления и фотолитографии пленочные алюминиевые емкостные обкладки датчиков силы и положения и коммутационные шины, а также глухое отверстие для перемещения массы;
- блок измерительный, содержащий сцентрированные по обкладкам емкостей датчиков механическую плату и плату-основание, которым соединены между собой методом электростатического соединения кремния и стекла; к плате-основанию с помощью стекла присоединен стеклянный корпус с обеспечением герметичности в области коммутационных шин;
- кремниевую крышку, присоединенную к корпусу с обеспечением вакуумирования, и кремниевую плату-развязку, присоединяемую к нижней плоскости основания и обеспечивающую исключение механических напряжений.

Конструкция МКС разработана НИИ ПМ (г. Москва), НИИФИ разрабатывает технологию изготовления МКС и подготавливает производство для выполнения опытных образцов и мелкосерийных поставок.

В настоящее время изготовлены экспериментальные образцы гироскопов, содержащих МКС и модуль аналоговой электроники, и проводится их отладка.

Датчик частоты вращения. Выполнен на основе модернизированного магнитодиода, разработанного ранее в МИЭТ (Зеленоград). Модернизированные конструктивно-технологические решения магнитодиода предусматривают легирование высокоомного кремния при пониженных температурах и формирование травлением локальных мезоструктур инжекционных областей диодов.

Датчик деформации. Датчики деформации выполнены в виде кремниевого тензорезистора на гибкой диэлектрической основе, в том числе со-

держающие встроенные интегральные датчики температуры.

Структура датчика: полиамидная пленка — кремниевый резистор толщиной 3...5 мкм — защитная пленка оксида — поликремниевый пленочный терморезистор.

Технология основана на "стоп"-травлении высоколегированных слоев кремния и использовании промежуточной защитной (несущей) пленки из металла.

В результате проведения работ по созданию новых технологий формирования кремниевых микрорезисторов механических систем для ЧЭ датчиков механических величин (акселерометров, датчиков скорости и др.) на сегодняшний день исследованы и отработаны следующие новые специальные технологические процессы:

- формирование прецизионным прямым травлением кремния многорельефных структур ЧЭ с минимальной высотой рельефа до 2 мкм;
- ориентированное травление кремния для обеспечения формирования структурных элементов ЧЭ с вертикальными стенками;
- плазмо-химическое травление кремния для профилирования и разделения кристаллов;
- формирование прецизионным травлением кремния X-образных элементов (консоль) в структуре ЧЭ;
- формирование методами гальванопластики технологических и конструктивных элементов структур ЧЭ;
- формирование методами легирования примеси и "стоп"-травления кремния элементов толщиной до 10 мкм с точностью $\pm 0,5$ мкм;
- формирование многослойных кремнево-стеклянных структур методом электростатического соединения;
- создание методами электростатического соединения кремния со стеклом вакуумно-плотных кремнево-стеклянных узлов ЧЭ;
- интегральная сборка ЧЭ с вакуумированными до $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. областями с обеспечением электрических гермовыводов из данных областей;
- формирование методами прецизионного анизотропного травления кремния кристаллов с точностью размеров мембран в профиле $\pm 15...25$ мкм;
- формирование тензорезисторов на кристалле с точностью их двустороннего совмещения с профилем не хуже $\pm 5...10$ мкм;
- формирование методами легирования примесью монокристаллических тензорезисторов и терморезисторов с электрофизическими параметрами, обеспечивающими температурную

компенсацию чувствительности в диапазоне температур $\pm 50^\circ\text{C}$;

- формирование кремнево-металло-стеклянных микросборочных узлов датчиков методами электростатического соединения, спекания и заливки, обеспечивающих герметизацию каналов подачи давления;
- создание кремниевых тензорезисторов толщиной 0,003...0,005 мм на основе высоколегированных кремниевых слоев с одновременным формированием над тензорезисторами пленки двуоксид кремния, обеспечивающей их защиту от влияния окружающей среды;
- соединение кремниевых тензорезисторов с гибкой диэлектрической основой с применением клеев, обеспечивающего их групповое формирование;
- формирование встроенного в кремниевые тензорезисторы на основе высоколегированных слоев интегрального терморезистора из пленки поликристаллического кремния, имеющего противоположный по знаку температурный коэффициент сопротивления по сравнению с тензорезисторами и обеспечивающего температурную компенсацию и расширение функциональных возможностей в части измерения температур;
- формирование методами размерного прецизионного травления кремния тензорезисторов в структурах КДК с размерами до 5...10 мкм;
- формирование структуры ЧЭ (мембрана-диэлектрик-тензорезисторы), имеющей низкие механические напряжения в рабочем диапазоне температур в обеспечении минимальных изменений начального выходного сигнала;
- формирование встроенных в кристалл ЧЭ интегральных схем для функциональной подгонки параметров при обеспечении минимизации начального выходного сигнала до ± 5 мВ и нормирование номинального выходного сигнала до $\pm 5\%$;
- формирование ЧЭ с двуполярной гальваноразвязкой тензосхемы от корпуса датчика вместо однополярной гальваноразвязки.

Освоенные техпроцессы позволяют разрабатывать и изготавливать ЧЭ датчиков механических величин со следующими основными характеристиками:

для акселерометров:

- диапазон измеряемых линейных ускорений 10...10 000 м/с^2 ;
- основная погрешность 0,01...0,1 м/с^2 ;

для датчиков угловой скорости (в стадии разработки):

- диапазон измеряемых угловых скоростей 10...10 000 $^\circ/\text{с}$;
- основная погрешность 0,1...10 $^\circ/\text{ч}$;

для датчиков давления:

- максимальная рабочая температура до $+200^\circ\text{C}$;
 - температурный уход чувствительности начального выходного сигнала до $+0,01...0,05\%/^\circ\text{C}$;
 - долговременная стабильность 0,1...0,2 %;
 - возможность работы в агрессивных средах на диапазонах давлений 5,0...10,0 МПа;
 - наличие двуполярной гальваноразвязки тензосхемы;
 - максимальная частота измеряемого переменного давления до 50 кГц;
 - минимальный диаметр датчика до 3 мм;
- #### для миниатюрных датчиков деформации:
- коэффициент тензочувствительности 10...50;
 - размер измерительной базы 0,5...1,0 мм;
 - габаритные размеры 2...4 мм;
 - наличие встроенного в ЧЭ измерителя температуры.

Таким образом имеющаяся в НИИФИ технология формирования объемных МЭМС обеспечивает создание широкой номенклатуры датчиков механических параметров.

Список литературы

1. Пат. 1431470 РФ. Тензометрический преобразователь и способ его изготовления.
2. Пат. 1459550 РФ. Способ изготовления кристаллов интегральных схем.
3. Пат. 2111576 РФ. Способ формирования рисунка в пленке двуокиси кремния на рельефной поверхности кремниевой пластины.
4. Пат. 2207658 РФ. Способ изготовления микромеханического чувствительного элемента емкостного типа.
5. Пат. 3 2200300 РФ. Полупроводниковый преобразователь деформации и способ его изготовления.