

Анализ влияния формы мембраны на механическую прочность и стабильность параметров МЭМС-сенсоров давления

А.И. Власов, Т.А. Цивинская, В.А. Шахнов

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана,
shakhnov@iu4.bmstu.ru

Аннотация — Статья посвящена анализу особенностей использования монокристаллического кремния в качестве конструкционного материала чувствительных элементов МЭМС. Основное внимание уделено анализу моделей рабочих кремниевых мембран чувствительного элемента преобразования давления, полученных разными методами: жидкостным анизотропным травлением и магнетронным методом сухого травления.

Ключевые слова — монокристаллический кремний, микродефекты, механические деформации, кремниевая мембрана, МЭМС-сенсоры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Топологический синтез мембран для МЭМС-сенсоров давления является актуальной задачей. Использование для этих целей кремния основано на том, что кристаллическая решётка кремния – кубическая гранцентрированная типа алмаза, но из-за большей длины связи между атомами Si-Si, по сравнению с длиной связи C-C, твёрдость кремния значительно меньше, чем алмаза. Этот факт делает кремний предпочтительным материалом при разработке чувствительных элементов для измерения малых механических деформаций [1-8]. Подобное расположение атомов в кристаллической решётке повышает чувствительность материала к механическому воздействию из-за возможности уменьшать межатомные расстояния без приложения больших усилий, при этом ход сближения атомов строго ограничен рамками кристаллической решётки. Поэтому усилие упругих деформаций, возникающих в материале при усилении сжатия, после снятия механической нагрузки обеспечивает восстановление прежних межатомных расстояний и, следовательно, исключает возникновение остаточных пластических деформаций, которые при измерениях дают погрешность дрейфа нулевого сигнала. Необходимо учитывать, что при нормальных условиях кремний химически малоактивен и активно реагирует только с газообразным фтором, при этом образуется летучий тетрафторид кремния SiF_4 . Такая «неактивность» кремния связана с пассивацией поверхности наноразмерным слоем диоксида кремния, немедленно образующегося в присутствии кислорода, воздуха или воды (водяных паров). Описанное выше свойство кремния, вместе с разработанными за последние годы новыми технологиями в области обработки материалов,

позволяет разрабатывать конструкции измерительных МЭМС-сенсоров миниатюрных размеров с широкими функциональными возможностями [2]. При создании МЭМС-сенсоров задействуется преимущественно приповерхностный слой материала (до десятков микрон), поэтому качество поверхности кристалла оказывает существенное влияние на электрофизические свойства материала и, соответственно, на свойства готового прибора. Поверхность сама по себе является наиболее серьёзным дефектом трёхмерной структуры кристалла: на границе раздела двух разных по структуре и химическому составу фаз Si и SiO_2 происходит реконструкция приповерхностных областей обеих фаз, регбридизация части поверхностных связей и образование новых, свойственных только поверхности химических группировок. Благодаря присутствию в поверхностной фазе перенапряжённых химических связей, вакансий и более сложных нарушений структуры граничная фаза становится более уязвимой к различного рода активным воздействиям по сравнению с объёмом кристалла. Актуальной проблемой топологического синтеза МЭМС-сенсоров остается то, что дефектообразование и дальнейшая деградация кристалла начинаются с поверхности наиболее деформированной области кристалла, что затрудняет получение устойчивых, повторяемых характеристик.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ПРОТИВОРЕЧИЯ

При изготовлении контрольно-измерительных чувствительных элементов повышаются требования к качеству кремния по всей толщине пластины. В результате удаления дефектного слоя на поверхности образуются микродефекты, которые распространяются вглубь объёма материала. Причём поверхностные атомы пластин, по сравнению с объёмными, имеют большее количество ненасыщенных химических связей, чем объясняется высокая адсорбционная способность, приводящая к загрязнениям рабочей поверхности. В зависимости от вида взаимодействия загрязнений с поверхностью различают физическую и химическую адсорбцию. Физическая адсорбция – результат межмолекулярного электростатического кулоновского взаимодействия. Частицы, совершая тепловые движения, обладают достаточным запасом энергии, чтобы преодолеть силы связи и

перемещаться, удаляясь с поверхности, или, наоборот, по механическим микродефектам попадают вглубь материала. К физически адсорбированным загрязнениям относятся все виды механических частиц, а также все виды органических материалов, связанные с поверхностью силами физической адсорбции. К химически адсорбированным загрязнениям относятся различные виды оксидных и сульфидных пленок на поверхности пластин, катионы и анионы химических веществ, применяемых в процессе очистки поверхности пластины.

Примеси или локальные нарушения кристаллической решётки образуют в материале неудаляемые очаги механических напряжений, так называемых дислокаций [3]. Дислокации оказывают существенное влияние на электрофизические свойства монокристаллов кремния и работу приборов, изготавливаемых на его основе. Учитывая, что скорость диффузионного потока вдоль дислокации на несколько порядков выше, чем в окружающем объёме, фронт диффузии при создании p-n-перехода оказывается неплоским, создавая высокие напряжённости электрического поля, которые могут способствовать электрическому пробое, что ухудшает качество и выход годных приборов. Кроме того, наличие дислокаций в исходном материале приводит к генерации новых дислокаций в процессе проведения диффузии или в процессе охлаждения кристалла после диффузии от высоких температур до температур ниже пластической деформации. Из выше сказанного ясно, что для получения высокоточного контрольно-измерительного элемента необходимо использовать полупроводниковые кристаллы с совершенной кристаллической решёткой или хотя бы максимально близкой к идеалу.

При изготовлении чувствительных элементов для контрольно-измерительных датчиков в объёме кристалла формируются рабочие элементы, повышающие чувствительность кристалла к изменениям величины измеряемой механической деформации [9-12]. В датчиках давления таким рабочим элементом служит мембрана квадратной формы, полученная методом жидкостного анизотропного травления в объёме кристалла, как показано на рис. 1.

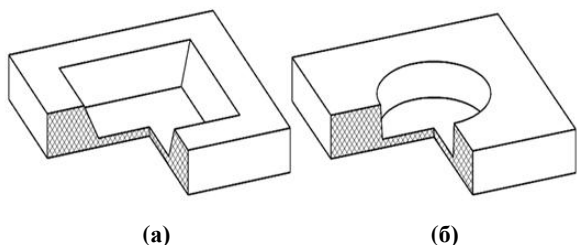


Рис. 1. Вид мембран, полученных путём анизотропного (а) и плазменного (б) травления кремния

Размеры мембраны, величина стороны квадрата и толщина зависят от величины измеряемого давления.

III. АНАЛИЗ РЕАЛИЗАЦИИ МЕМБРАН ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Анизотропное травление основано на разнице скоростей травления разных плоскостей монокристаллического кремния [13]. В большинстве случаев жидкостные анизотропные травители представляют собой многокомпонентные растворы, состоящие из окислителя, который окисляет кремний до гидратированного диоксида кремния, и комплексообразователя, предназначенного для образования растворимого комплексного иона и воды [4]. Недостатки данного метода: необходимость защиты лицевой поверхности, низкое качество всех типов средств защиты при глубоком травлении, вероятность проникновения раствора травителя по дефектам в маскирующем слое к элементам датчика и их повреждению, образование неровностей на поверхности травления и сложность получения тонкой рабочей мембраны [11]. Наибольшее количество микродефектов образуется на границе изменения толщины материала и поверхности дна.

Современные методики 3D-моделирования позволяют наглядно показать подтравы и микродефекты на поверхности мембраны и в зоне крепления мембраны (рис. 2).

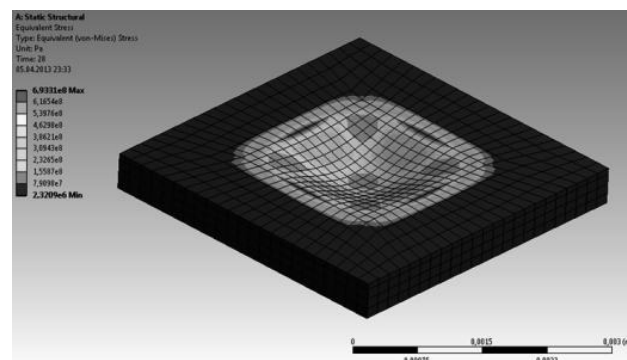


Рис. 2. Распределение значений (зоны выделены градацией серого согласно легенде) упругой деформации по поверхности мембраны, полученной методом анизотропного травления

Подтверждаются результаты расчётов и моделирования при проведении контрольных испытаний чувствительного элемента на механическую прочность: разрушение мембраны во всех случаях происходит по границе формирования мембраны и в первую очередь в местах максимальных значений отчётливо видимых упругих деформаций.

Кроме основных зон упругих деформаций выделяются области упругих деформаций, расположенные по углам мембраны и зависящие от правильности геометрии контуров зоны травления, количества и величины дислокаций, сформированных в процессе травления.

Эти дополнительные области упругих деформаций существуют по своим не до конца изученным законам. В настоящее время неизвестен точный математический аппарат и надёжный аппаратный способ

корректировки погрешностей измерений, обусловленных именно данными областями деформаций. Нейтрализовать их влияние на параметры чувствительного элемента технологическими методами удается только частично. Чувствительный элемент работает в условиях переменных значений температуры и давлений, и, следовательно, остаточные напряжения в зоне сформированных упругих деформаций под влиянием изменений условий рабочей среды будут способствовать образованию новых областей дислокаций в структуре кремния, а это, в свою очередь, приведёт к искажению прямолинейной характеристики изменения выходного сигнала чувствительного элемента от изменения давления, что особенно заметно на обратном ходе мембраны при сбрасывании давления, когда проявляется динамический гистерезис. Динамический гистерезис возникает в результате изменения положения микродефектов и растворённых в кристаллической решётке кремния атомов загрязнения под влиянием приложенных напряжений. Остаточные напряжения деформации, связанные с миграционными процессами микродефектов, также оказывают влияние на долговременную стабильность начального и выходного сигналов [12].

IV. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СУХОГО ТРАВЛЕНИЯ

Плазменное и реактивное ионное травление являются наиболее распространёнными видами сухого травления. Кроме того, в последнее время большое внимание уделяется магнетронному методу сухого травления. Магнетронным разрядом называют диодный газовый разряд в скрещенных полях (существует область пространства в разрядном объёме, где электрическое и магнитное поля ортогональны друг другу $B \perp E$). Этот метод хорош тем, что процесс проходит без нагрева и, следовательно, без нарушения структуры материала и создания новых дислокаций. Ориентация кристалла при «сухом» травлении не имеет значения, химические реакции запускаются внешней энергией в виде высокочастотной мощности при пониженном давлении в камере. По сравнению с анизотропным плазменное травление менее точное, поскольку в зависимости от давления и состава газа, геометрии электрода и рассеиваемой мощности может существовать небольшой боковой подтрав, но оно может обеспечивать форму упругого элемента, которую достаточно тяжело создать при помощи анизотропного травления, например круглую мембрану (рис. 1б), и меньшую толщину рабочей мембраны, что важно при разработке датчиков на сверхмалые давления с малыми габаритными размерами. Также преимуществом является высокая анизотропия процесса и отсутствие необходимости проведения дополнительных операций для удаления с поверхности продуктов реакции и сторонних примесей, содержащихся в исходных реагентах.

На рисунке 3 показано, что форма круга обеспечивает значительно меньшие значения упругих деформаций в области границы формирования рабочей

мембраны, и, что самое главное, значения деформаций равномерно распределены по контуру мембраны и в материале мембраны.

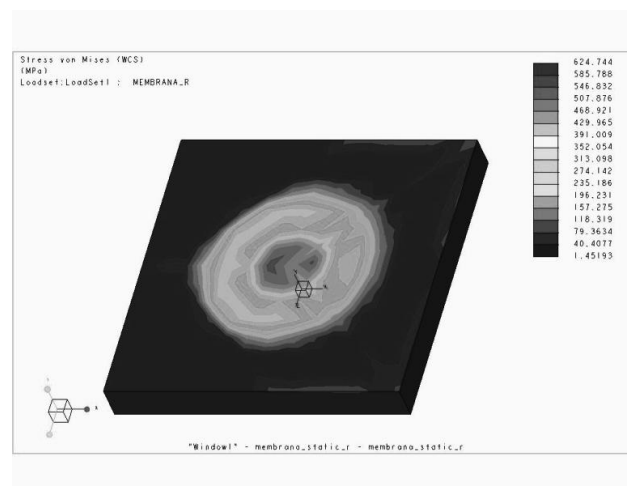


Рис. 3. Распределение значений (зоны выделены градацией серого согласно легенде) упругой деформации по поверхности мембраны, полученной методом «сухого» травления

Подобное распределение значений упругой деформации позволяет рассматривать кремниевую мембрану как плоскую мембрану, закреплённую по контуру и нагруженную давлением [5]. Характер деформации мембраны зависит от величины прогибов, которые она получает под нагрузкой. При малых прогибах, а в датчиках давления – не более 0,15 мм, перемещения мембраны возникают в основном в результате изгибных деформаций, располагающихся между границей основного материала кристалла и срединной плоскостью. Срединная плоскость (срединной плоскостью называется плоскость, равностоящая от плоскости кристалла) мембраны сохраняет свои размеры в области малых перемещений. Следовательно, область максимальных значений упругой деформации остаётся неизменной и поэтому не может активно влиять на формирование дислокаций в области мембраны, подвергающейся изгибным деформациям. Отсюда вывод: мембрана имеет выраженную линейную характеристику. При расчёте мембраны в области малых перемещений можно воспользоваться линейной теорией изгиба круглых пластинок.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Круглая мембрана – ввиду отсутствия критических значений механических деформаций на границе формирования мембраны – способна выдержать большие механические перегрузки, чем квадратная без дополнительных конструкторских доработок чувствительного элемента [7].

Распределение упругих деформаций строго по зонам позволяет методом технологических приработок разработать универсальную технологию, позволяющую нейтрализовать влияние локальных

дислокаций в объёме кремния на погрешность параметров датчика [6].

Распределение упругих деформаций обеспечивает, при условии малых перемещений, прямолинейную характеристику изменений напряжения с измерительного моста чувствительного элемента от изменения давления, действующего на мембрану.

Область максимальных упругих деформаций в центральной части мембраны при сбрасывании нагрузки с мембраны, стремясь к равновесию сил, будет способствовать возвращению мембраны в первоначальное состояние и тем самым уменьшать погрешность измерения на обратном ходе мембраны.

Уменьшение в процессе изготовления кристалла факторов, влияющих на возникновение в структуре материала локальных очагов дислокаций и микродефектов, обеспечивает долговременную стабильность параметров датчика.

Чёткая форма окружности позволяет использовать наработанные методы математического анализа и расчёта оптимальных с точки зрения обеспечения рабочих параметров датчика, размеров мембраны и расчёта интегральной схемы преобразования механической деформации мембраны в чёткий и стабильный электрический сигнал [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фалькевич Э. С. Технология полупроводникового кремния - М.: Металлургия. 1992. 408 с.
- [2] Денисов А.А., Кальнов В. А., В. А. Шахнов Проектирование Наносенсоров - М. Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. Сер. Библиотека "Наноинженерия". Том 6. 126 с. ил.:

- [3] Е.Ю. Кокориш, Н.Н. Шефталъ Дислокации в полупроводниковых кристаллах // Успехи физических наук. Т. LXXII, вып.3.
- [4] З.Ю. Готра Технология микроэлектронных устройств - М.: Издательство «Радио и связь». 1991. 527 с.
- [5] Л.Е. Андреева Упругие элементы приборов - М. Машгиз, 1962. 456 с.
- [6] Андреев К.А., Милешин С.А., Цивинская Т.А. Анализ методов электростатической сварки кремния и стекла при производстве высокоточных датчиков // Датчики и системы. 2013. № 2 (165). С. 45-49.
- [7] Андреев К.А., Власов А.И., Шахнов В.А. Кремниевые преобразователи давления с защитой от перегрузок // Датчики и системы. 2014. № 10. С. 54-57.
- [8] Власов А.И. Пространственная модель оценки эволюции методов визуального проектирования сложных систем // Датчики и системы. 2013. № 9 (172). С. 10-28.
- [9] Власов А.И., Стешенко В.Б., Нестеров В.А., Мысловский Э.В. Методы цифровой обработки сигналов тактильных чувствительных элементов мембранного типа // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5. С. 37.
- [10] Борзов А.Б., Лихоеденко К.П., Цивинская Т.А. и др. Термокомпенсация измерительного канала датчика давления на основе полупроводниковых интегральных преобразователей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11. С. 21.
- [11] Takanashi K. Sensor Materials for the Future: Intelligent Materials /Sensors and Actuators V 13 № 1, 1988. 145 pp.
- [12] Stephen C. Jacobsen, David L. Wells, Clark C. Davis, John E. Wood. Fabrication of Micro-Structures Using Non-Planar Lithography (NPL) //Proceeding of 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Nara. Japan. Jan.1991. pp. 45-50.
- [13] Lee D. B. Anisotropic Etching of Silicon // Journal of Applied Physics 1969, V40, №11, p. 4569-4572.

Analysis of the effect of membrane shape at mechanical strength and parameter stability of MEMS pressure sensors

V.A. Shakhnov, A.I. Vlasov, T.A. Tsivinskaya

Bauman Moscow State Technical University, shakhnov@iu4.bmstu.ru

Keywords — single-crystal silicon, microdefects, mechanical deformations, silicon membrane.

ABSTRACT

Topological synthesis of membranes for MEMS pressure sensors is an actual task. Using of silicon for these purposes is based on the fact that the crystal lattice of silicon is cubic face-centered like diamond, but because of the bigger length of between atoms of Si-Si in comparison with communication length of C-C, hardness of silicon is much less than that of diamond. This does silicon preferable material when developing sensitive elements for measurement of small mechanical deformations.

At production of control and measuring sensitive elements, requirements to quality of silicon through all thickness of a plate raise. Because of removal of a defective layer, surface microdefects are formed, which extend into the depth of the material. In addition, superficial atoms of plates in comparison with volume atoms have bigger quantity of nonsaturated chemical bonds, that explains the high adsorptive ability leading to contamination of working surface. Depending on the type of interaction of contaminants with the surface, physical and chemical absorption are distinguished. Physical adsorption is the result of intermolecular electrostatic Coulomb interaction: a particle, making the thermal movements, possess a sufficient stock of energy to overcome the binding forces and to move, being removed

from the surface or, opposite way, get into the depth of material through mechanical microdefects. Physically adsorbed contamination are all types of mechanical particles, as well as all types of organic materials connected to the surface by forces of physical adsorption. Different types of oxide and sulphide films on surfaces of plates, cations and anions of the chemicals applied in the course of cleaning of plate surface, refer to chemically adsorbed contaminants.

METHODS

At production of sensitive elements for control and measuring sensors, working elements increasing sensitivity of a crystal to changes of size of the measured mechanical deformation are formed in its volume. In pressure sensors such working element is the membrane of square shape received by method of liquid anisotropic etching in volume of a crystal. The membrane size, length of square side and thickness depend on the size of the measured pressure.

Anisotropic etching is based on difference of speeds of etching of the different planes of single-crystal silicon. In most cases, liquid anisotropic etchants are multi component solutions consisting of an oxidizer which oxidizes silicon to the hydrated silicon dioxide, and the complex basis intended for formation of a soluble complex ion and water. Shortcomings of this method are the need of protection of a front surface, poor quality of all types of protection means at deep etching, probability of penetration of solution of etchants through defects in the masking layer to elements of the sensor and their damage, formation of roughnesses on surfaces of etching and complexity of receiving thin working membrane. The greatest number of microdefects are formed on border of change of material thickness and on bottom surface.

Modern techniques of 3D modeling allow demonstrating etching defects and microdefects on surface of membrane and in zone of membrane attachment. Results of calculations and modeling when carrying out control tests of a sensitive element for mechanical durability are confirmed: in all cases destruction of membrane occur just on border of formation of membrane, and first of all in places where the maximum values of elastic deformations are clearly visible.

Besides the main zones of elastic deformation, the following zones can be noted as areas of elastic deformations: the zones of etching, located on corners of a membrane and depending on correctness of geometry of contours, quantity and size of dislocations created in the course of etching.

Plasma and jet ionic etching are the most widespread types of dry etching. Moreover, magnetron dry etching method has been discussed recently.

Orientation of crystal at "dry" etching doesn't matter, chemical reactions are started by external energy in the form of high-frequency power at the lowered pressure in a chamber. In comparison with anisotropic, plasma etching is less accurate as depending on pressure and composition of gas, geometry of an electrode and the disseminated

power. Small side etching defects can exist; however, it can provide a form of an elastic element, which is rather difficult for creating by means of anisotropic etching, for example, a round membrane. Smaller thickness of a working membrane is important when developing sensors for mid-pressure with small overall dimensions. In addition, advantage is in high anisotropy of process and lack of need of carrying out additional operations for removal of products of reaction and the third-party impurity, which are contained in initial reagents, from the surface.

The form of a circle provides considerably smaller values of elastic deformations in the field of membrane border formation of a working membrane and the most important is that these values are evenly distributed on a contour of a membrane and in membrane material.

Such distribution of values of elastic deformation allows considering the silicon membrane as the flat membrane fixed on a contour and loaded by pressure. Nature of deformation of a membrane depends on the size of deflections, which it receives under loading. At small deflections, and in pressure sensors no bigger than 0.15 mm, movements of membrane arise generally as the result of flexural deformations, which are settling down between border of the main material of the crystal and the median plane. The median plane (the median plane is the plane equidistant from the crystal plane) membranes keep the sizes at small movements. Therefore, the area of the maximum values of elastic deformation remains invariable and therefore cannot actively influence formation of dislocations in the area of membrane exposed to flexural deformations. Conclusion is that the membrane has the distinct linear characteristic. When calculating a membrane in the field of small movements it is possible to use the linear theory of bending of round plates.

RESULTS

The round membrane, in view of lack of critical values of mechanical deformations on border of formation of a membrane, is capable to sustain bigger mechanical overloads than square membrane, without additional design completions of sensitive element.

Distribution of elastic deformations strictly on zones allows developing the universal technology allowing neutralizing influence of local dislocations in volume of silicon at error of sensor parameters, by method of technological extra earnings.

Distribution of elastic deformations provides, at condition of small movements, rectilinear characteristic of tension changes, received from the measuring bridge of a sensitive element, from change of pressure affecting the membrane.

Area of the maximum elastic deformations in the central part of membrane, when dropping loading from a membrane, will strive to balance of forces and help return of a membrane to the initial state; and by that reduce measurement error on reverse motion of membrane.

Reduction of factors, influencing appearance of local centers of dislocations and microdefects in structure of material, in the course of production of a crystal, provides long-term stability of parameters of the sensor.

The accurate form of a circle allows using the best practice methods of mathematical analysis and calculation of optimum structures, from the point of view of ensuring working parameters of the sensor, the sizes of a membrane and calculation of the integrated circuit of transformation of mechanical deformation of a membrane to an accurate and stable electric signal.

REFERENCES

- [1] Falkevich E. S. Technology of semiconductor silicon – Moscow, Metallurgy. 1992. 408 p. (in Russian).
- [2] Denisov A.A., Kalnov V. A., V. A. Shakhnov Proektirovaniye Nanosensorov - M. MGTU publishing house of N.E. Bauman, 2011. It is gray. Nanoinzheneriya library. Volume 6. 126 p. (in Russian).
- [3] E.Yu. Kokorish, N. N. Sheftal Dislokatsii in semiconductor crystals//Progress of physical sciences. Vol. LXXII, issue 3. (in Russian).
- [4] Z.Yu. Gotra Tekhnologiya of microelectronic devices – Moscow, Radio and Communication publishing house. 1991. 527 p. (in Russian)
- [5] L.E. Andreyeva Elastic elements of devices – Moscow, Mashgiz, 1962. 456 p. (in Russian).
- [6] Andreyev K.A., Milesheva S. A., Tsivinskaya T.A. The analysis of methods of electrostatic welding of silicon and glass by production of high-precision sensors // Sensors and systems. 2013. No. 2 (165). PP.45-49. (in Russian).
- [7] Andreyev K.A., Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Silicon converters of pressure with protection against overloads // Sensors and systems. 2014. No. 10. PP.54-57. (in Russian).
- [8] Vlasov A.I. Spatal model of the assessment of evolution of methods of visual design of difficult systems //Sensors and system. 2013. No. 9 (172). PP.10-28. (in Russian).
- [9] Vlasov A.I., Steshenko V. B., Nesterov V.A., Myslovsky E.V. Methods of digital processing of signals of tactile sensitive elements of membrane type // Science and education: scientific publication of MGTU of N.E. Bauman. 2012. No. 5. PP.37. (in Russian).
- [10] Borzov A.B., Likhoyedenko K.P., Tsivinskaya T.A., etc. Thermal compensation of the measuring channel of the sensor of pressure on the basis of semiconductor integrated converters // Science and education: scientific publication of MGTU of N.E. Bauman. 2012. No. 11. PP.21. (in Russian).
- [11] Takanashi K. Sensor Materials for the Future: Intelligent Materials/Sensors and Actuators V 13 No. 1, 1988. 145 pp.
- [12] Stephen C. Jacobsen, David L. Wells, Clark C. Davis, John E. Wood. Fabrication of Micro-Structures Using Non-Planar Lithography (NPL)//Proceeding of 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Nara. Japan. Jan.1991. pp. 45-50.
- [13] Lee D. Century of Anisotropic Etching of Silicon//Journal of Applied Physics 1969, V40, No. 11, p. 4569-4572.