

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

МИХАЙЛОВ П.Г.

Профессор кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского, г. Пенза тел. 89273788810, pit_mix@mail.ru,

ЗЛАТОГОРСКИЙ М.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского. zma199@yandex.ru;

КЛЕЙМЕНОВ Ю.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского yusef.k.a@mail.ru;

ВЕРЕВКА А.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского king_of_cross@mail.ru;

УСАЧЕВ А.

Магистрант кафедры «ПиБИ» Пензенского филиала МГУТУ им. К.Г. Разумовского andreu.us17@gmail.com.

Аннотация

Статья посвящена формообразующим процессам, используемых при изготовлении микромеханических датчиков физических величин для информационных систем. Описаны различные методы и технологии формообразования кремниевых чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков.

При формировании объемных элементов и структур микромеханических устройств (ММУ), в частности, чувствительных элементов измерительных преобразователей (ИП), используется несколько методов, действие которых основано на удалении материала. При этом, комбинируя определенные из них, можно получить большое разнообразие форм ММУ. К данным методам относятся: 1 группа – жидкостные травители (мокрое травление): анизотропное жидкостное травление в щелочных травителях; изотропное жидкостное травление в кислотных травителях; электрохимическое травление в электролитах; 2 ая группа – газовые травители (сухое травление):-газовое травление в среде агрессивных газов; ионное травление с использованием ускоренных электромагнитном поле ионов инертных газов; плазмохимическое травление с использованием плазмы химически активных газов.

Из данного перечня наибольшее применение для целей формообразования нашли анизотропное жидкостное травление и, в меньшей мере, изотропное жидкостное и электрохимическое виды травления. Это отчасти объясняется тем, что анизотропное и изотропное травление не требуют, в отличие от плазмохимического и электрохимического, сложной аппаратуры и оснастки.

Рассмотрена общая проблема формирования микромеханических элементов (ММЭ) методами травления: при формообразовании деталей из анизотропных

материалов (к которым относится и монокристаллический кремний), в отличие от изотропных, необходимость учета не только химического состава и состояния травителя (температуры, концентрации), но и анизотропию процесса травления.

Ключевые слова: микромеханика; травление; анизотропный; изотропный; газовый; жидкостной

Введение Микроэлектронные датчики и технологии в настоящее время являются наиболее перспективным направлением в измерительной технике и приборостроении. Это связано с огромными преимуществами, которые обусловлены ценой, функциональными возможностями и массогабаритными характеристиками. В групповых технологиях, используемых в микросистемной технике (МСТ), основными технологическими операциями являются операции формообразования чувствительных элементов и сенсорных структур, формируемых на поверхности и в теле полупроводника.

Основная часть. При формировании объемных элементов и структур микромеханических устройств (ММУ), в частности, чувствительных элементов (ЧЭ) измерительных преобразователей (ИП), используется несколько методов, действие которых основано на удалении материала. При этом, комбинируя определенные из них, можно получить большое разнообразие форм ММУ [1]. К данным методам относятся:

1. Анизотропное жидкостное травление;
2. Изотропное жидкостное травление;
3. Электрохимическое травление;
4. Газовое травление;
5. Ионное травление;
6. Плазмохимическое травление.

Из данного перечня наибольшее применение для целей формообразования нашли анизотропное жидкостное травление и, в меньшей мере, изотропное жидкостное и электрохимическое виды травления. Это отчасти объясняется тем, что анизотропное и изотропное травление не требуют, в отличие от плазмохимического и электрохимического, сложной аппаратуры и оснастки [2].

Следует отметить общую сторону проблемы формирования микромеханических элементов (ММЭ) методами травления: при формообразовании деталей из анизотропных материалов, в отличие от изотропных, необходимо учитывать не только химический состав компонентов травителя, температуру, концентрацию, время травления, но и векторный характер границы травления, определяющий выделение и удаление тех или иных плоскостей и граней фигур травления (рис. 1) [3].

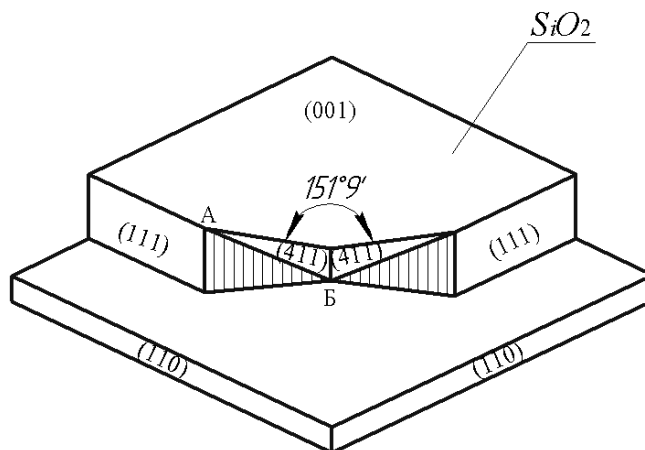


Рис. 1. Анизотропия плоскостей монокристаллического кремния, характеризующая процесс жидкостного травления

Таким образом, для обеспечения управляемости процессом формообразования необходимо [4]:

- учитывать кристаллографическую ориентацию формообразующих поверхностей;
- знать характер (скорость и направление) травления плоскостей выбранным травителем;
- иметь данные по оптимальному составу травителя и технологическим режимам травления, обеспечивающим наилучшее качество формообразующей поверхности;
- иметь диагностические критерии и аппаратное обеспечение, позволяющие осуществлять контроль процесса формообразования.

По традиции сложившейся в микроэлектронике для планарных структур операция формообразования относится к группе операций фотолитографии, предназначением которых является создание на обрабатываемой поверхности защитной маски, через которую осуществляют локальное травление материала (кремния, алюминия, SiO_2 и т.д.). В этом случае конфигурация получаемых фигур травления зависит от параметров маски: конфигурации, ориентации, толщины и химической стойкости. При глубинах травления для планарных структур порядка 1,5...2 мкм анизотропия материала мало проявляется, поэтому для условно двумерных структур данная операция является стандартной и хорошо контролируемой. Так же практически не бывает проблем при изготовлении элементов и структур на основе КНС – структур. Благодаря малой толщине эпитаксиального слоя Si ($\approx 1,5...2$ мкм), можно получить большое разрешение и высокую точность формируемых фигур при травлении Si пленки в стандартном травителе. При этом на 100% конфигурация окисной маски совпадает с формой получаемых в процессе травления мезаструктур [5, 6].

Дальнейшее развитие полупроводниковых приборов и интегральных схем привело к необходимости формирования трехмерных структур: транзисторов с боковой изоляцией, гетероструктур, схем со щелевой изоляцией и проч. Многочисленные эксперименты показали, что в этих случаях необходимо учитывать анизотропию процессов травления полупроводниковых материалов: эффекты бокового растравления под маской, выявление граней преимущественного травления и т.д. Без учета указанных и ряда других факторов невозможно формирование работоспособных полупроводниковых приборов и структур с требуемыми техническими характеристиками. Далее, по мере освоения

и развития новых направлений в области оптических интегральных схем, ПАВ структур, гетероструктур и проч., вопросы управления формой и размерами микроструктур выходят на первое место, так как без их корректного решения невозможно формирование трехмерных структур с повторяемыми размерами и конфигурацией.

Следует отметить, что в ММС наряду с традиционным материалом полупроводниковых приборов и ИМС используются такие функциональные материалы как арсенид галлия, карбид кремния, нитрид алюминия, моно и поликристаллический алмаз и др.[7, 8]. Кроме того, в микромеханике нашли применение такие поли типы кремния как аморфный кремний и поликристаллический кремний. Проводящие материалы, используемые в ММС, так же имеют широчайшую номенклатуру: начиная от традиционных Al – тонких пленок, заканчивая силицидами тугоплавких и благородных металлов. Количество изолирующих и защитных материалов в ММС так же очень велико - это окислы, нитриды, бориды, полимерные композиции и т.д. При проведении формообразующих операций с такими значительно различающимися между собой по физико-химическим свойствам материалами, требуется творческий подход, заключающийся в выборе селективных травителей, определении механизма взаимодействия травителя с различными материалами, определении оптимальных режимов травления. Как показал опыт, многие жидкостные и газовые травители имеют изотропный характер травления, что не позволяет их использовать для формирования прецизионных малогабаритных элементов ММУ. Выходом из этого положения является использование селективных анизотропных травителей, травящих только определенный материал (селективность) и в определенном направлении (анизотропия). На практике высокоселективных травителей очень мало, поэтому для защиты не удаляемых материалов и получения необходимой конфигурации ММЭ используются защитные маски на основе фоторезистов, металлических, полимерных и окисных пленок. При значительных глубинах травления, которые характерны для трехмерных ММС и ПЧЭ МЭД, целесообразно использовать композиционные маски, представляющие собой комбинацию из окисных, металлических и фоторезистивных масок, которые могут быть обработаны ионными или лазерными излучениями для повышения стойкости [9]. При этом фоторезистивная маска используется, как правило, для профилирования основной (окисной или металлической) маски.

При жидкостном травлении кремния в качестве материала основной маски используются: SiO_2 , Si_3N_4 и их комбинация; БСС; ФСС; Cu; Au; Cr. Эти технологические маски после проведения профилирования ММС удаляются, так как в процессе травления их толщина уменьшается, а поверхность ухудшается и они уже не могут выполнять защитных функций. Поэтому после проведения формообразующих операций маски стравливаются, а для защиты элементов ММУ при дальнейших технологических операциях, вновь формируются защитные слои методом термического или газофазного нанесения, химического и электрохимического осаждения. Скорость стравливания масок в значительной мере зависит от концентрации и температуры травителя (рис. 2) [10].

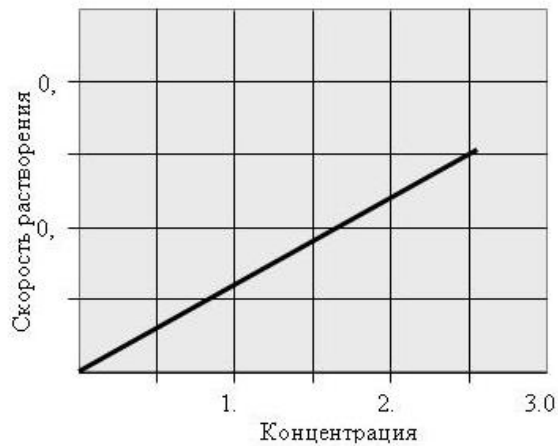


Рис. 2. Зависимость скорости травления SiO_2 при 23°C .

Математическая модель процесса травления, в общем виде, может быть представлена [11]:

$$U_{\text{тр}} = \frac{k_{\text{диф}} \cdot k \cdot e^{-E/kT}}{k_{\text{диф}} + k \cdot e^{-E/kT}} \cdot C, \quad (1)$$

где k – константа скорости химической реакции, E – энергия активации реакции травления, $k_{\text{диф}}$ – коэффициент пропорциональности диффузионного процесса, C – концентрация травителя.

В зависимости от лимитирующей стадии в процессе травления (химическая реакция на поверхности, диффузия реагентов в поверхностный слой, адсорбция реагентов, десорбция продуктов реакции) имеют место два случая:

1. $k_{\text{диф}} \ll e^{-E/kT}$, тогда $U_{\text{тр}} = k_{\text{диф}} \cdot C$ - травление в данном случае является полирующим и не зависит от энергии активации E .

2. $k_{\text{диф}} \gg e^{-E/kT}$, т.е. $U_{\text{тр}} = k \cdot C \cdot e^{-E/kT}$, в этом случае $U_{\text{тр}}$ существенно зависит от E . В свою очередь, когда E зависит от КГО поверхности, характер травления будет анизотропным, т.е. $U_{\text{тр}}$ будет не скаляром, как в первом случае, а вектором.

В первом случае характер травления будет изотропным, при котором фронт травления формируется равномерным и избирательность будет отсутствовать. Во втором случае при АТ большое значение имеет выбор технологических режимов травления и материала маскирующего покрытия.

Рассмотрим из всех видов формообразующего травления, жидкостное анизотропное травление (АТ), как наиболее распространенного при изготовлении ЧЭ ИП [12].

АТ кремния имеет значительные преимущества перед другими видами формообразующих операций:

- позволяет получать строго контролируемые размеры и формы СЭ;
- позволяет управлять процессом травления простыми методами;
- достигается значительная плотность пространственного расположения элементов;
- достигается минимизация остаточных внутренних механических напряжений;
- высокая повторяемость и воспроизводимость фигур травления;
- простота технологического оснащения и контроля процесса травления.

В качестве АТ для кремния используются несколько травителей:

- раствор единого калия в воде ($\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}$);
- водный раствор этилендиамина и пирокатехина: $\{\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_2\text{NH}_2-\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2\}$;
- раствор гидразина $\{\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2\text{H}_4\}$;
- раствор щелочи и изопропилового спирта в воде $\{\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_3\text{COONCH}_3\}$;
- раствор в составе гидразина, изопропилового спирта и воды.

Все эти составы содержат окислитель, который при взаимодействии с кремнием образует SiO_2 и комплексообразующий реагент, взаимодействующий с SiO_2 , в результате чего получается растворимый комплексный ион и вода.

Анизотропный характер травления указанными травителями характеризуется значительной разницей в скоростях травления для плотно упакованных $\{(111)\}$ для Si} и слабо упакованных $\{(100)\}$ для Si} плоскостей монокристаллических материалов – рис. 3 [13]. Следует отметить, что хотя публикаций по вопросам анизотропного травления Si существует достаточно много, но из-за многопараметрической зависимости процесса травления (состава травителя, концентрации компонентов, температуры, типа защитной пленки, времени и т.п.) рекомендации по режимам проведения технологических операций, реактивам и технологической оснастке должны быть обязательно проверены на практике на конкретных изделиях и технологическом оборудовании. Как показал опыт, отличия могут быть довольно существенными, а сам конкретный процесс часто является объектом «know-how».

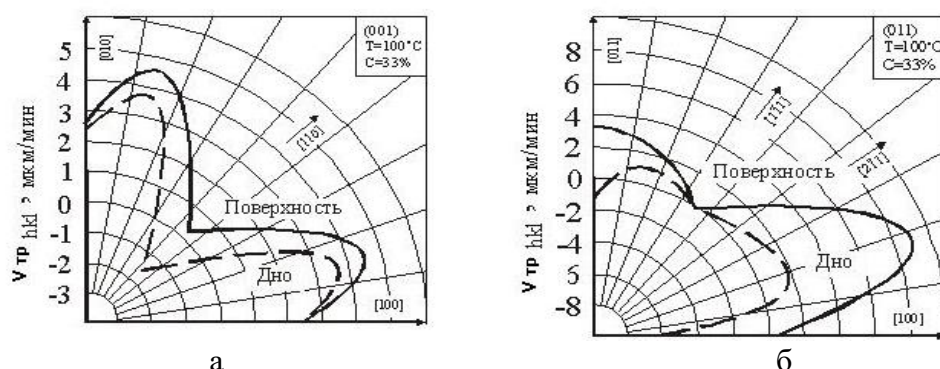


Рис. 3. Диаграмма анизотропии скорости травления кремния в 33% КОН при 100°C для плоскостей: а-(001) и для б-(011)

Приведем несколько характерных примеров АТ монокристаллического кремния в щелочных травителях – рис. 4 и рис. 5 [14, 15].

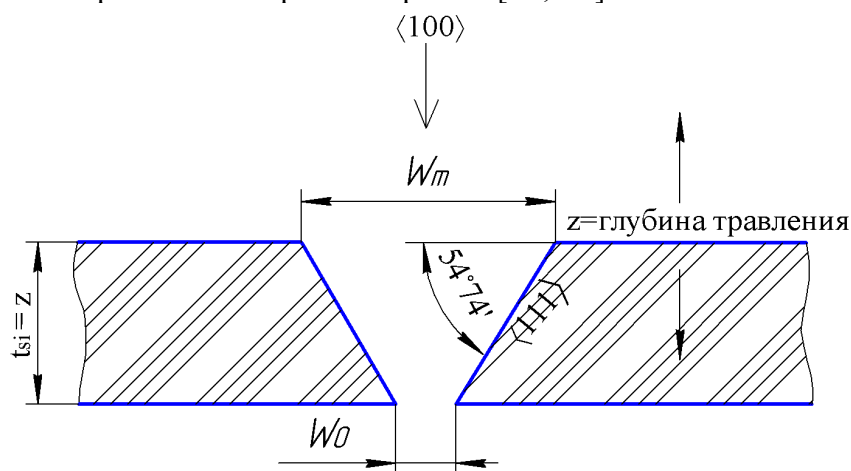


Рис. 4. Исходная модель проектирования защитной маски

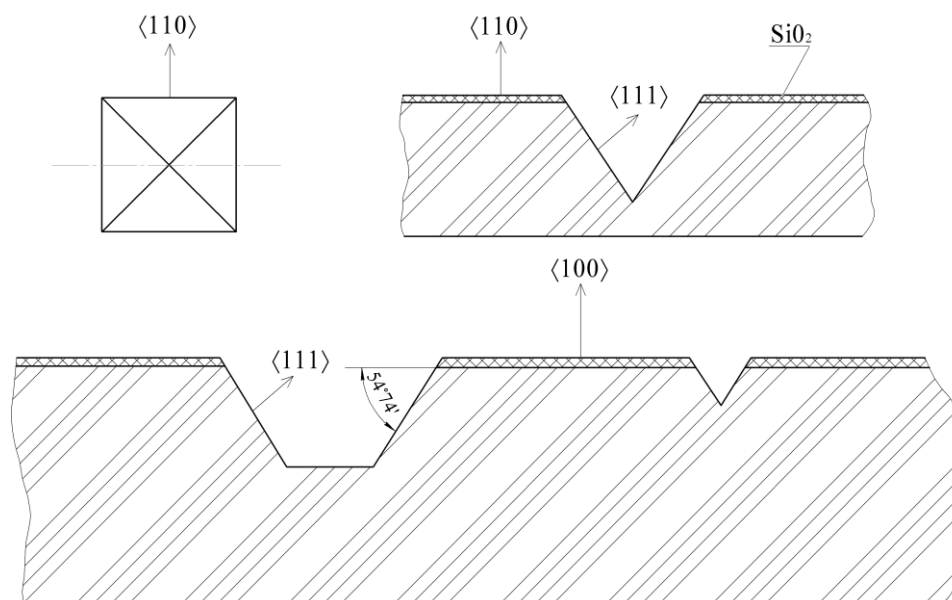


Рис. 5. Схематическое изображение вытравленных элементов при использовании квадратной маски

Заключение

Технологии формообразования ЧЭ и сенсорных структур датчиков характеризуются сложностью и слабой управляемостью, так как точность и качество получаемых структур зависит от большого числа факторов и условий проведения процессов травления. Для повышения степени управляемости процессов формообразования, в первую очередь, необходимо тщательно подбирать концентрацию травителя, температуру процесса и отслеживать глубину профиля, а также высоту и форму наружных фигур травления.

Список литературы

1. Михайлов П.Г. Формообразование сенсорных элементов и структур микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. 2004–№ 2 С. 67-69.
2. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы: учеб. Пособие / М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. Михайлов П.Г. Формообразующие процессы создания микромеханических устройств // Микросистемная техника. 2003–№ 7–С. 10-13.
4. Михайлов П.Г. Мокров Е.А. Управление микроструктурами полупроводниковых датчиков физических величин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 3(164) 2015 С. 175-184.
5. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник – М.: Радио и связь, 1991.
6. Михайлов П.Г., Цибизов П.Н. Модификация материалов микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. 2003–№ 6 С. 65-68.
7. Михайлов П.Г., Сергеев Д. А., Соколов А. В. Высокотемпературные функциональные материалы для датчиков физических величин Сб. тр. I Межд. научно-практической конф. «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе» Пенза Изд-во ПГУ. 2012 С. 289 -291.
8. Михайлов П.Г., Михайлов А.П. Материалы микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. М, 2003 - №3 С. 19-21.
9. Модификация и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными потоками под ред. Дж.Поути / М.: Машиностроение 1987.
10. Михайлов П.Г., Цибизов П.Н. и др. Формообразующие технологии в микромеханических устройствах // Университетское образование: Сборник материалов VIII Международной научно-методической конференции.–Пенза: ПДНТП, 2004 С. 230-23
11. Михайлов П.Г., Цибизов П.Н. Технология формообразования в микромеханике Университетское образование: // Сборник материалов VIII Международной научно-методической конференции.–Пенза: ПДНТП, 2004 С. 232-234
12. Ваганов, В. И. Интегральные преобразователи / М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.

13. Гридчин, В. А., Драгунов В. П. / Физика микросистем : учеб. пособие ; в 2 ч. Ч. 1 / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 416 с.

14. Михайлов П.Г. Микромеханические устройства и приборы. Учебное пособие. / Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007 174 с.

15. Микроэлектромеханические датчики. *MEMS Mechanical Sensors* / Stephen Beeby/ Graham Ensell, Michael Kraft and Heil White.15 2004. Англ.

MICROMECHANICAL TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF MEASURING CONVERTERS OF INFORMATION SYSTEMS

MIKHAILOV P.G.

Professor of the department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky, city of Penza tel. 89273788810, pit_mix@mail.ru,

ZLATOGORSKY M.

Graduate of the department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky. zma199@yandex.ru;

KLEIMMEN Y.

Master of the Department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky yusef.k.a@mail.ru;

VEREVKA A.

Master of the Department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky king_of_cross@mail.ru;

USACHEV A.

Master of the department "PIBI" Penza branch of the MGUTU them. K.G. Razumovsky andrey.us17@gmail.com.

Abstract

The article is devoted to the form-forming processes used in the manufacture of micromechanical sensors of physical quantities for information systems. Various methods and technologies for the formation of silicon sensitive elements (CHE) of sensors are described.

When forming volumetric elements and structures of micromechanical devices (MMUs), in particular, sensitive elements of measuring converters (PI), several methods are used, the action of which is based on the removal of the material. At the same time, combining certain of them, one can obtain a wide variety of forms of MMUs. These methods include: 1 group - liquid etchants (wet etching): anisotropic liquid etching in alkaline etchants; isotropic liquid etching in acidic etchants; electrochemical etching in electrolytes; 2nd group - gas etchants (dry etching): - gas etching in aggressive gases; ion etching using inert-gas ions accelerated by the electromagnetic field; plasma-chemical etching using plasma of reactive gases.

From this list, anisotropic liquid etching and, to a lesser extent, isotropic liquid and electrochemical etching have found the greatest application for shaping purposes. This is partly due to the fact that anisotropic and isotropic etching does not require, in contrast to plasmachemical and electrochemical, complex equipment and equipment.

The general problem of the formation of micromechanical elements (MME) by etching methods is considered: when forming parts from anisotropic materials (including monocrystalline silicon), in contrast to isotropic, the need to take into account not only the

chemical composition and the state of the etchant (temperature, concentration) but also the anisotropy process of etching.

Key words: micromechanics; etching; anisotropic; isotropic; gas; liquid

Bibliography

1. Mikhailov P.G. Formation of sensory elements and structures of microelectronic sensors // New industrial technologies. 2004-No. 2 P. 67-69.
2. Raspopov, V. Ya. Micromechanical Devices: Textbook. Manual / M.: Mechanical Engineering, 2007. - 400 p.
3. Mikhailov P.G. Form-forming processes for creating micromechanical devices // Microsystem technique. 2003-No. 7-C. 10-13.
4. Mikhailov P.G. Mokrov E.A. Control of microstructures of semiconductor sensors of physical quantities // Izvestiya Southern Federal University. Technical science. No. 3 (164) 2015 pp. 175-184.
5. Gotra Z.Yu. Technology of microelectronic devices. Handbook - M.: Radio and Communication, 1991.
6. Mikhailov PG, Tsibizov PN Modification of materials of microelectronic sensors // New industrial technologies. 2003-No. 6 pp. 65-68.
7. Mikhailov PG, Sergeev DA, Sokolov AV High-temperature functional materials for sensors of physical quantities. tr. I Int. scientific and practical conf. "Innovative technologies in the machine-building complex" Penza Izd-vo PGU. 2012 pp. 289 -291.
8. Mikhailov PG, Mikhailov AP Materials of microelectronic sensors // New industrial technologies. M, 2003 - № 3 pp. 19-21.
9. Modification and doping of a surface by laser, ionic and electron fluxes, Ed. J. Pauti / M: Mechanical Engineering 1987.
10. Mikhailov PG, Tsibizov PN Form-forming technologies in micromechanical devices // University Education: Collection of Materials of the VIII International Scientific and Methodical Conference. -Penza: PDNTP, 2004 C. 230-23
11. Mikhailov PG, Tsibizov PN Technology of Formation in Micromechanics University Education: // Proceedings of the VIII International Scientific and Methodical Conference. - Penza: PDNTP, 2004, pp. 232-234.
12. Vaganov, V.I. Integral transducers / M.: Energoatomizdat, 1983. 136 p.
13. Gridchin, VA, Dragunov VP / Physics of microsystems: Textbook. allowance; in 2 hours Part 1 / Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2004. - 416 p.
14. Mikhailov P.G. Micromechanical devices and devices. Tutorial. / Penza: Information and Publishing Center of the PGU, 2007 174 p.
15. Microelectromechanical sensors. MEMS Mechanical Sensors / Stephen Beeby / Graham Ensell, Michael Kraft and Heil White.15 2004. Eng.