

## Раздел III. Встраиваемые системы с использованием МЭМС-датчиков

УДК 681.586

П.Г. Михайлов, Е.А. Мокров

### УПРАВЛЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

*Проанализированы методы и цели управления электрофизическими характеристиками (ЭФХ) элементов и структур датчиков физических величин (ДФВ). Показано, что для управления ЭФХ, с целью обеспечения временной и параметрической стабильностью, необходимо формирование постоянных или временных стабилизирующих обратных связей (ОС) в многоуровневой структуре ДФВ, используя при этом технологии математического моделирования. Конструктивно постоянные ОС в форме обратных преобразователей (ОП) или схемотехнических элементов формируются в процессе или после изготовления элементов и структур датчиков, а временные функционируют только в течение времени проведения той или иной технологической операции формирования элементов и структур ДФВ, например, при термообработке, диффузии, ионной имплантации и проч. Отмечено, что для микроэлектронных датчиков (МЭД) давления, температуры и иных параметров, не имеющих в своем составе подвижных элементов, вопросы разработки и применения ОП не нашли еще должного решения. В связи с этим, в таких датчиках для управления сенсорными структурами предлагается использовать полевые методы управления (управление с помощью физических полей). Рассмотрены обобщенные конструкции ОП, работа которых основана на полевых методах управления, апробированные в МЭД силовых параметров. Обратные преобразователи использованы на различных уровнях МЭД, начиная от отдельных сенсорных элементов (тензорезисторы) и заканчивая измерительной системой. Показано, что принцип действия полевых ОП основан на рассмотрении полупроводника в виде функциональной среды, которой можно управлять, путем использования целенаправленных внешних воздействий. Предложено в качестве внешних управляющих воздействий, использовать генерируемые физические поля различной природы. На примере пленочных структур проведено аналитическое и численное моделирование компенсации механических деформаций, вызванных температурными воздействиями на чувствительный элемент МЭД. Сделаны выводы о перспективности работ по обеспечению стабильности датчиков с помощью постоянных и временных обратных связей.*

*Датчик; чувствительный элемент; пленка; обратный преобразователь; обратная связь; полевое управление; система; уровень; микроэлектронный; характеристика; электро-физическая.*

P.G. Mikhailov, E.A. Mokrov

### MANAGEMENT MICROSTRUCTURES OF SEMICONDUCTOR SENSORS OF PHYSICAL QUANTITIES

*The methods and objectives of management electrophysical characteristics (EPC) elements and structures of sensors of physical quantities (SPQ). It is shown that management EPC, in order to provide temporary and parametric stability is necessary to form permanent or temporary stabilizing feedback (FB) in the layered structure of SPQ, using mathematical models. Structurally permanent FB in the form of reverse converters (RC) or circuitry elements formed during or after*

*fabrication sensor elements and structures, and temporary function only during the time of a particular process step forming elements and structures SPQ, for example, heat treatment, diffusion, ion implantation and so on. It is noted that for microelectronic sensors (MES) pressure, temperature and other parameters that do not have in their composition of mobile elements, the development and use of the RC did not even find a proper solution. Therefore, in such sensors to control the sensory structures are encouraged to use the field control methods (control via physical fields). Consider the generalized design RC, which are based on field management practices, tested in MES power parameters. Inverters used at different levels MES from individual sensor elements (strain gauges) to the measuring system. The principle of operation is based on the RC field that the semiconductor is essentially a functional fluid which can be controlled using these or other external influences, in particular generated via physical fields. For example film structures, the analytical and numerical models compensate mechanical deformations caused by temperature influence on sensing element MES. The conclusions about the prospects of work to ensure the stability of sensors using permanent and temporary feedback.*

*Sensor; sensing element; film, inverter; feedback; field management; system level; microelectronic; characteristic electro-physical.*

**Актуальность темы.** Управление свойствами различных материальных объектов, включая оборудование, вещества, системы, роботы и проч. с целью получения необходимых результатов и достижения определенных целей является актуальной задачей во всех отраслях науки и техники [1, 2]. Примерами целенаправленного управления свойствами металлов и сплавов является легирование сталей небольшими количествами металлов, при этом в значительной мере изменяются эксплуатационные свойства материалов в части повышения прочностных свойств, увеличение стойкости к агрессивным средам и проч. Аналогичными примерами могут быть пьезоэлектрические керамики, определенные добавки в которых коренным образом влияют на их электрофизические характеристики [3].

Следует отметить, что управление свойствами физических объектов предполагает наличие или формирование постоянных или временных обратных связей на различных иерархических уровнях [4–6]:

- ◆ в материале – это кристалл, домен, ансамбль частиц и проч.
- ◆ на уровне физического элемента или структуры – это, например, области с различным уровнем легирования и типом примесей, пленочные структуры и т.д.
- ◆ уровень сборочной единицы – это неподвижные и соединения, гетерогенные структуры и т.д.
- ◆ на уровне устройства или изделия – это разного рода обратные преобразователи, актюаторы и проч.

Управление предполагает наличие физико-математических моделей рассматриваемой системы, из которых можно определить возможные механизмы модификации ее свойств. При этом следует отметить, что математическое моделирование состояния и функционирования многоуровневых систем, имеющих различные математические описания происходящих в них физических эффектов зачастую или сильно затруднено, или вообще невозможно [7, 8].

Так, применительно к современным ДФВ, которые, по своей сути, являются многоуровневыми системами, на нижнем уровне (кристалл, домен), используется математический аппарат квантовой физики, а на верхнем – математический аппарат квалитметрии и алгоритмические языки и программирование [9–11].

Указанные противоречия можно преодолеть, используя для моделирования ДФВ, так называемые уровневые модели, которые позволяют на соответствующем физическом уровне использовать свои модели, например, структурные и определять свои механизмы управления ЭФХ сенсорных элементов и структур ДФВ [12, 13].

**Пути реализации:** В части конструктивно-технологической реализации ОП и других элементов и структур ДФВ, наиболее приемлемым типом технологий является микроэлектромеханическая (МЭМС-технология). При этом интеграция микромеханических конструкций чувствительных элементов (ЧЭ) со схемами обработки, усиления и согласования позволяет качественно улучшить основные характеристики ДФВ.

Как известно [14], для обеспечения стабильности ДФВ целесообразно на каждом системном уровне формировать постоянные и временные обратные связи (ОС) (рис. 1). Конструктивно постоянные ОС в форме обратных преобразователей (ОП) или схмотехнических элементов формируются в процессе или после изготовления элементов и структур датчиков, а временные функционируют только в течение времени проведения той или иной технологической операции формирования элементов и структур ДФВ, например, при термообработке, диффузии, ионной имплантации и проч. [15].

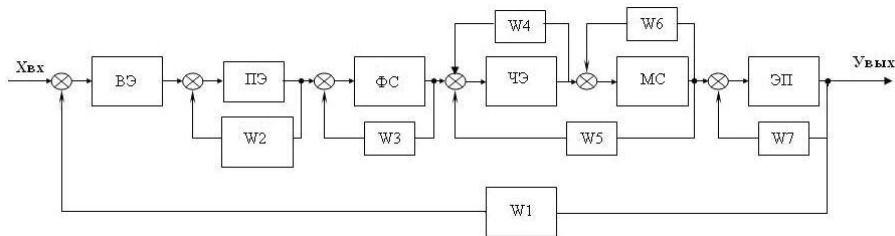


Рис. 1. Структурная схема микроэлектронного датчика с многоуровневыми обратными связями: ВЭ – воспринимающий элемент, ПЭ – передающий элемент, ФС – физическая среда, ЧЭ – чувствительный элемент, МС – мостовая схема, ЭП – электронный преобразователь  $W_i$  – обратный преобразователь

В ДФВ, имеющих встроенные ОП, данным элементам уделяется особое внимание, так как от точности и стабильности параметров ОП зависят основные метрологические характеристики датчиков в целом [16].

Необходимо отметить, что для традиционных датчиков: электромагнитных, емкостных, потенциометрических и проч., которые изготавливаются с применением ручных операций, проблема изготовления и использования ОП решена довольно успешно [17]. Для нового же класса датчиков – МЭД, проблема разработки и формирования ОП в настоящее время решена только для емкостных микромеханических акселерометров, имеющих подвижный электрод и использующих в ОП электростатический метод преобразования [18, 19].

Для твердотельных МЭД давления, температуры и иных параметров, не имеющих в своем составе подвижных элементов, вопросы разработки и применения ОП не нашли еще должного решения. В связи с этим, в таких датчиках для управления сенсорными структурами предлагается использовать полевые методы управления (управление с помощью физических полей).

Рассмотрим обобщенные конструкции ОП, работа которых основана на полевых методах управления, апробированные в МЭД силовых параметров. Обратные преобразователи использованы на различных уровнях МЭД, начиная от отдельных сенсорных элементов (тензорезисторы) и заканчивая измерительной системой. Принцип действия полевых ОП основан на том, что полупроводник по своей сути является функциональной средой, которой можно управлять, используя те или иные внешние воздействия, в частности, с помощью генерируемых физических полей.

Следует отметить, что при выборе типа и конструкции ОП очень важными критериями являются их конструктивная и технологическая совместимость с конструкциями и технологиями формирования элементов и структур полупроводниковых ЧЭ МЭД.

Так на элементном уровне эффективными методами воздействия являются использование эффекта изменения проводимости пьезорезисторов под действием внешнего электрического поля (рис. 2). В этом случае управление сопротивлением тензорезисторов аналогично управлению проводимостью канала «исток-сток» в МДП-структурах [20, 21]. Конструктивно один или несколько тензорезисторов мостовой схемы МЭД перекрываются алюминиевым экраном, на который подается напряжение с делителя, подключенного к выходным элементам схемы датчика.

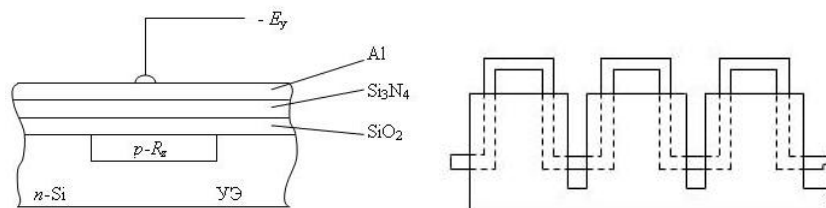


Рис. 2. Полевое управление тензочувствительными структурами:  
УЭ – упругий элемент,  $R_Z$  – пьезорезистор,  $E_y$  – управляющее напряжение

Еще одним из методов управления, используемых в ОП МЭД, может служить эффект фоточувствительности диффузионных резистивных структур (рис. 3).

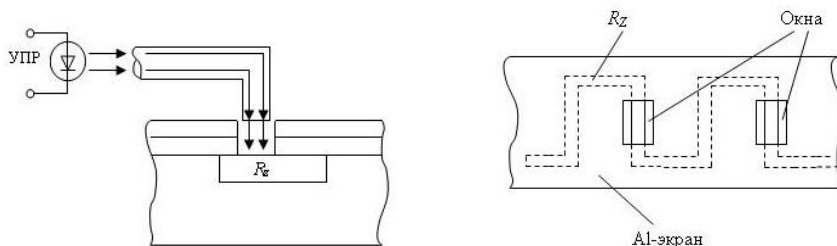


Рис. 3. Обратные преобразователи, использующие эффект фоточувствительности тензорезистивных структур:  
УПР – управляющий сигнал,  $R_Z$  – пьезорезистор

Данный метод предполагает использование оптического излучения, подаваемого через планарный или дискретный световод на отдельные участки пьезорезисторов. Вследствие наличия в кремнии внутреннего фотоэффекта при облучении неэкранированного участка диффузионной структуры его проводимость увеличивается.

Зависимость основных параметров МЭД от температуры, можно также использовать при построении ОП. В качестве примера реализации тепловых ОП на рис. 4 показаны ОП, действие которых основано на создании в объеме или на поверхности сенсорных элементов градиентных температурных полей. Нагрев или охлаждение отдельных участков, а также всего чувствительного элемента осуществляется с помощью диффузионных нагревателей (рис. 4,а) или элементов тепла и холода (элемент Пельтье – рис. 4,б) [22–24].

Еще одним из решений по формированию ОП в структуре ЧЭ МЭД, является использование механических деформационных полей, получаемых с помощью формирования многослойных пленочных структур или объемных диффузионных зон расположенных на поверхности или в объеме ЧЭ [25–27].

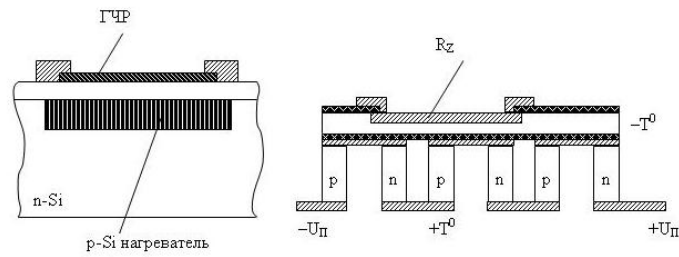


Рис. 4. Структуры МЭД, использующие тепловые обратные преобразователи:  $U_{п}$  – напряжение питания,  $R_z$  – тензорезистор, ГЧР – газочувствительный резистор

**Моделирование деформационных полей в полипленочных структурах.**

Применяя комбинированные методы, предполагающие использование тепловых преобразователей и полипленочных композиций, формируемых на чувствительном элементе, можно достаточно эффективно управлять деформациями всего ЧЭ или его отдельных участков [28–31]. Варьирование параметрами таких ОП возможно путем выбора температурных коэффициентов расширения (ТКР) отдельных пленок (рис. 5).

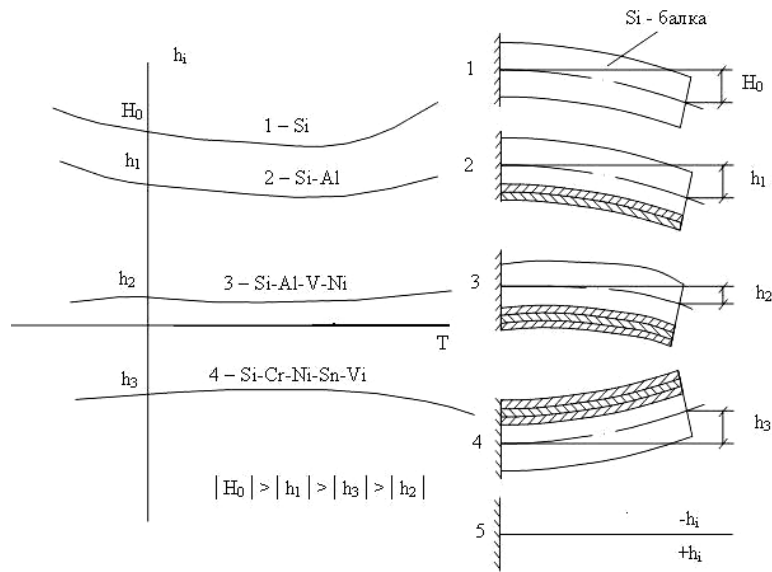


Рис. 5. Графическая модель управления уровнем механических напряжений с помощью металлических пленочных композиций: 1-Si; 2-Si-Al; 3-Si-Al-V-Ni; 4-Si-Cr-Ni-Sn-Vi; 5-скомпенсированный ЧЭ

Моделирование уровня термических напряжений для элементов и структур ЧЭ, в большинстве своем основываются на расчете изгиба биметаллических пластин и формуле Стоуни, связывающие радиус изгиба подложки с нанесенной на нее пленкой с их характеристиками и температурой [32]:

$$R = \frac{1}{6} h \left[ 3 \left( 1 + h_1/h_2 \right)^2 + \left( 1 + E_1 h_1/E_2 h_2 \right) \left( h_1^2/h_2^2 + E_2 h_2/E_1 h_1 \right) \right] / \left( \alpha_1 - \alpha_2 \right) \left( T - T_0 \right) \left( 1 + h_1/h_2 \right), \quad (1)$$

где  $h = h_1 + h_2$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – ТКР пленки и подложки;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $E_1$  и  $E_2$  – толщины и модули Юнга соответственно пленки и подложки.

Для наиболее распространенных в ЧЭ сочетаний структурных элементов «пленка – подложка»:  $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ , имеем:  $E_1 \approx E_2$ , а  $h_1 = h_{\text{SiO}_2} \ll h_2 = h_{\text{Si}}$ , при этом модель (1) может быть значительно упрощена:

$$R = \frac{E_2 \cdot h_2^2}{6(\alpha_1 - \alpha_2)(T - T_0)E_1 h_1}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окисления.

Напряжения, возникающие от изгиба структуры в подложке (Si) и в пленке ( $\text{SiO}_2$ ), могут быть определены:

$$\sigma_{\text{Si}}^{\max} = \frac{\frac{E_1 h_1^3}{1 - \mu_1} + \frac{E_2 [h_2^3 + 3h_2^2(h_1 + h_2)]}{1 - \mu_2}}{6R h_2 (h_1 + h_2)}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{SiO}_2}^{\max} = \frac{\frac{E_1 h_2^3}{1 - \mu_2} + \frac{E_1 [h_1^3 + 3h_1^2(h_1 + h_2)]}{1 - \mu_1}}{6R h_1 (h_1 + h_2)}. \quad (4)$$

Учитывая, что  $h_1 \ll h_2$ , получаем

$$\sigma_{\text{Si}}^{\max} = \frac{2E_2 h_2}{3R(1 - \mu_2)} = c_2 \cdot \frac{h_2}{R}; \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{SiO}_2}^{\max} = \frac{E_2 h_2^2}{6R h_1 (1 - \mu_2)} = c_1 \cdot \frac{h_2^2}{R h_1}. \quad (6)$$

Используя справочные данные приведенные в [32, 36] для кремния и оксида, находим, что  $c_1 = 0,3 \cdot 10^5$  МПа,  $c_2 = 0,91 \cdot 10^5$  МПа.

Подставляя в выражение (2) значения  $\alpha_{\text{SiO}_2} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ,  $\alpha_{\text{Si}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ,  $\Delta T = (1473 - 293) \text{K} = 1180 \text{K}$ ,  $E_1 = 0,8 \cdot 10^5$  МПа для ( $\text{SiO}_2$ ),  $E_2 = 1,3 \cdot 10^5$  МПа для (Si),  $\mu_1 = 0,18$ ,  $\mu_2 = 0,25$  и, учитывая, что  $h_1 \ll h_2$  получаем

$$R \approx -1 \cdot 10^2 \cdot h_2^2 / h_1. \quad (7)$$

Знак минус в (7) указывает на выпуклость композиционной структуры Si– $\text{SiO}_2$ .

Для  $h_{\text{SiO}_2} = 1$  мкм и кремниевой подложки толщиной  $H_{\text{Si}} \approx 200$  мкм, что характерно для ЧЭ МЭД, имеем  $|R| \approx 2$  м.

Подставляя упрощенное выражение (7) в (5) и (6), получаем числовые модели термических напряжений:

$$\sigma_{\text{Si}} = -\frac{C_2 h_1}{1 \cdot 10^{-2} h_2} \approx 5 \text{ МПа}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{SiO}_2} = -\frac{C_1}{1 \cdot 10^{-2}} \approx -3 \cdot 10^2 \text{ МПа}. \quad (9)$$

Исходя из полученных значений механических напряжений для структур Si– $\text{SiO}_2$ , можно с высокой достоверностью утверждать следующее:

- ◆ термонапряжения (ТН) в окисной пленке – сжимающие, а в подложке – растягивающие;
- ◆ напряжение в Si растут с ростом толщины  $\text{SiO}_2$ ;
- ◆ напряжения в  $\text{SiO}_2$ , наоборот, уменьшаются с ростом толщины  $\text{SiO}_2$ .

Представляют значительный практический интерес значения ТН, существующих в структурах «монокремний–поликремний» («МК–ПК»), используемых в настоящее время для изготовления высокотемпературных МЭД [15].

Для структур с уменьшенной толщиной, предназначенных для ЧЭ, имеем:

$T_0 = T_{0 \text{ осаж}} = 600^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{\text{ПК}} = 3,82 \cdot 10^{-6}$ ,  $E_{\text{ПК}} \approx E_{\text{МК}}$ ,  $\mu_{\text{ПК}} \approx \mu_{\text{МК}}$ ,  $h_{\text{ПК}} \approx 1,0$  мкм,  $h_{\text{МК}} = 200$  мкм;

$$R \approx \frac{h_2^2}{6(\alpha_{\text{ПК}} - \alpha_{\text{МК}})(\Delta T)h_1} \approx 92 \text{ м}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{ПК}} = E \frac{h_2^2}{6Rh_1(1-\mu)} \approx 12 \text{ МПа}; \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{МК}} \approx 0,7 \cdot \frac{Eh_2}{R(1-\mu)} \approx 2,5 \text{ МПа}. \quad (12)$$

Таким образом, в структурах «МК–ПК», поликремниевая пленка находится в сжатом состоянии, а монокремниевая подложка – в растянутом.

В настоящее время в качестве защитного диэлектрика находят применение пленки нитрида кремния (НК) –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , которые по некоторым параметрам (химической стойкости, пробивному напряжению и т.п.) превосходят традиционные пленки  $\text{SiO}_2$ .

Оценим уровень напряжений в структурах монокремний–нитрид кремния, для которых:

$\alpha_{\text{НК}} = 3 \cdot 10^{-6}$ ,  $E_{\text{НК}} \approx 1,5 \cdot 10^5$  МПа,  $T_0 = T_{0\text{С}} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 0,26$ ,  $h_{\text{НК}} = 1,0$  мкм,  $h_{\text{МК}} = 200$  мкм.

Аналогичные расчеты, выполненные по (10–12), приводят к значениям:

$$R \approx 8 \text{ м}, \quad \sigma_{\text{НК}} \approx 2 \cdot 10^2 \text{ МПа}, \quad \sigma_{\text{МК}} \approx 4 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Из анализа приведенных выше зависимостей и числовых значений напряжений можно сделать следующие выводы:

- ◆ минимальный уровень ТН имеют поликремниевые пленки;
- ◆ средний уровень ТН наблюдается у пленок нитрида кремния;
- ◆ максимальный уровень ТН существует у окисных пленок.

Таким образом, ПК и НК пленки из поликремния и нитрида кремния целесообразно использовать в ЧЭ МЭД, рассчитанных на измерение малых значений механических величин и высокую температуру эксплуатации, так как применение таких пленок позволяет управлять уровнем механических напряжений в ЧЭ с возможностью их компенсации в определенном температурном диапазоне.

Варьируя технологическими режимами, можно изменять величину и знак внутренних механических напряжений, как одиночных пленок, так и пленочных композиций с целью управления и оптимизации электрофизическими характеристиками ЧЭ и МЭД.

Кроме изоляционных и защитных пленок на ЧЭ формируются различные металлические пленки: экранирующие, контактные, теплорассеивающие, защитные, при этом площадь, которую они занимают на ЧЭ, может составлять от (10...30) % (контактная металлизация) до 100% (экран) от всей поверхности кристалла. Материалами пленок служат различные металлы, такие как Cr, V, Sn, Vi, Ni, W, Ta, Au, Al, Pb, сплавы – нихром, W–Re и др., силициды тугоплавких и благородных металлов. При этом толщина металлических пленок сравнима с толщиной диэлектрических пленок, а температура формирования может быть достаточно высокой, поэтому внутренние напряжения, возникающие в пленках, могут в значительной мере влиять на характеристики ЧЭ датчиков. Попытаемся оценить уровень и характер внутренних напряжений в металлопленочных системах, а так же исследовать возможность их регулирования. Упрощенные расчеты внутренних напряжений в пленках проводят аналогично по формулам Стоуни (2 и 3).

В частности, выбирая соответствующие пары материалов, имеющих значительные различия в ТКР, например металл и керамика, металл-окисная пленка при нагреве или охлаждении структуры с помощью встроенных пленочных нагревателей или элементов Пельтье, можно деформировать упругий элемент и расположенные на нем сенсорные элементы.

На рис. 6, 7 приведены примеры конкретных МЭД, в которых использованы выше описанные полевые ОП.

На рис. 6 приведена структурная схема металлопленочного МЭД силовых параметров, у которого на поверхности упругого элемента сформированы пленочные структуры, служащие для компенсации влияния температуры измеряемой среды на характеристики датчика.

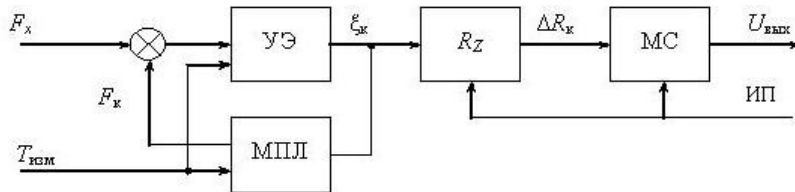


Рис. 6. Структурная схема МЭД силовых параметров с термокомпенсационными металлопленочными покрытиями: МПП – металлические пленки,  $R_Z$  – тензорезистор, ИП – источник питания,  $F_k$  – компенсирующая сила,  $F_x$  – измеряемая сила,  $T_{изм}$  – температура измеряемой среды

На рис. 7 приведены функциональная и структурная схемы виброчастотного МЭД давления, в упругом элементе которого с помощью диффузионного нагревательного резистора возбуждаются резонансные колебания.

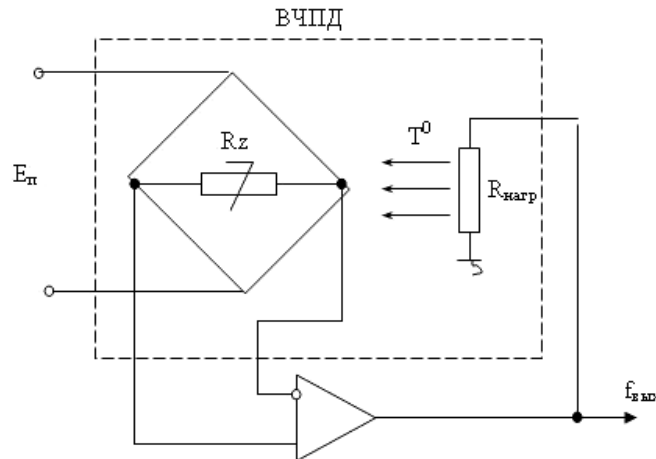


Рис. 7. Виброчастотный МЭД: ВЧПД – виброчастотный преобразователь давления, УЭ – упругий элемент, МС – мостовая схема,  $R_z$  – тензорезистор,  $R_{нагр}$  – резистивный нагреватель, У – усилитель,  $f_{вых}$  – выходной частотный сигнал,  $\Delta R$  – изменение сопротивления,  $P_x$  – измеряемое давление,  $E_n$  – напряжение питания,  $T$  – температура нагрева,  $U_x$  – выходное напряжение с мостовой схемы

**Выводы.** Таким образом, описанные полевые методы управления ЭФХ и конструкции ОП дают возможность наметить новые пути создания стабилизированных МЭД, позволяющие существенно повысить их временную и параметрическую стабильность. Следует отметить, что применение полевых компенсирующих преобразователей является одним из перспективных направлений развития микроминиатюрных и микромеханических МЭД.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорф Р, Бишон Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2002. – 832 с.
2. Bhattacharyya, S.P., Datta A., Keel L.H. Linear control theory: structure, robustness and optimization. – CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2009.
3. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 7. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с.
4. Вавилов В.Д. Интегральные датчики. – Н-Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2003. – 499 с.
5. Михайлов П.Г. Стабильность микроэлектронных датчиков и технологий. – Пенза: ПГУ 2003. – 231 с.
6. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
7. Веремей Е.И. Линейные системы с обратной связью: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 448 с.
8. Михайлов П.Г. Микроэлектронные датчики: вопросы разработки // Микросистемная техника. – 2003. – № 1. – С. 4-7.
9. Клевцов С.И. Принципы преобразования физических сигналов в датчиках систем сбора и обработки информации. Ч. 1: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 96 с.
10. ГОСТ Р 51086-97 Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. Госстандарт России ИПК Издательство стандартов, 1997.
11. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. Госстандарт России ИПК Издательство стандартов 2009.
12. Михайлов П.Г. Микроэлектронные датчики, особенности конструкций и характеристик // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2004. – № 6. – С. 38-42.
13. Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О. Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2014. – № 6. – С. 27-34.
14. Михайлов П.Г., Белозубов Е.М. Методы обеспечения стабильности микроэлектронных датчиков (системный подход) // Мир измерений. – 2007. – № 7. – С. 47-50.
15. Михайлов П.Г., Мокров Е.А. Скотников В.В., Петрин В.А. Сергеев Д.В., Чернецов М.А. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 204-213.
16. Михайлов П.Г., Соколов А.В. Модели обратных преобразователей микроэлектронных датчиков // Цифровые модели в проектировании и производстве РЭС: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. проф. Н. К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – Вып. 17. – С. 262-268.
17. Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник под ред. Багдатьяева Е.Е., Гориша А.В., Малкова Я.В. – М.: ИПРЖР, 1998.
18. Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Скотников В.В. Использование обратных преобразователей в микроэлектронных датчиках // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2014. – № 6. – С. 22-26.
19. Михайлов П.Г., Лапшин В.И., Сергеев Д.А. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5. – С. 128-133.
20. Ching-Liang Dai. A capacitive humidity sensor integrated with micro heater and ring oscillator circuit fabricated by CMOS-MEMS technique // Sensors and Actuators: Chemical. – 2006. – № 116.
21. Викулин Н.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Радио и связь, 1990.
22. Hongsith N., Wongrat E. Sensor Response Formula for Sensor Based on ZnO Nanostructures. // Sens. Actuators. – 2010. – Vol. 144. – P. 67-72.
23. Wongchoosuk C., Wisitsoraat A. Portable Electronic Nose Based on Carbon Nanotube-SnO<sub>2</sub> Gas Sensors and Its Application for Detection of Methanol Contamination in Whiskeys // Sens. Actuators B. – 2010. – Vol. 147. – P. 392-399.

24. Process to Realise a Cantilever on Fabric Using a Piezoelectric Layer to Detect Motion for Wearable Applications // *Sens. Actuators*. – 2013. – Vol. 203. – P. 241-248.
25. *Freund L.B., Suresh S.* Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution. Cambridge: Cambridge University Press 2003. – 802 с.
26. *Janssen G.C., Dammers A.J.* Tensile stress in hard metal films // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 83, № 16. – P. 3287-3289.
27. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
28. *Huang Z.Y., Hong W.* Nonlinear analyses of wrinkles in a film bonded to a compliant substrate // *J. Mech. Phys. Solids*. – 2005. – Vol. 53, № 9. – P. 2101-2118.
29. *Pang Y, Huang R.* Nonlinear effect of stress and wetting on surface evolution of epitaxial thin films // *Phys. Rev. B*. – 2006. – Vol. 74, № 7.
30. *Huang R., Stafford C.M., Vogt B.D.* Effect of surface properties on wrinkling of ultrathin films // *J. Aerospace Eng.* – 2007. – Vol. 20, № 1. – P. 38-40.
31. *Huang R.* Dynamics of wrinkle growth and coarsening in stressed thin films // *Phys. Rev. E*. – 2006. – Vol. 74, № 2.
32. *Сергеев В.В.* Напряжения и деформации в элементах микросхем. – М.: Радио и связь, 1988.
33. *Михайлов П.Г., Ожикенов К.А.* Механические и тепловые деформации в микромеханических структурах сенсорных элементов // *Известия Национальной академии наук Республики Казахстан Серия физико-математическая*. – 2014. – № 4. – С. 163-168.
34. *Amarasinghe, R.* Design and fabrication of miniaturized six-degree of freedom piezoresistive acceleromete // *MEMS 2005: 18th IEEE International Conference on microelectromechanical systems*. – P. 351-354.
35. *Chen Po-Jui, Rodger D. C., Humayun M. S.* Unpowered spiral-tube parylene pressure sensor for intraocular pressure sensing // *Sensors and Actuators Physical*. – 2006. – № 127. – P. 276-282.
36. *Михайлов П.Г.* Методы управления механическими напряжениями в сенсорных элементах и системах микроэлектронных датчиков // *Датчики и системы*. – 2004. – № 9. – С. 10-12.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. М.Ю. Звездина.

**Михайлов Петр Григорьевич** – Пензенский государственный технологический университет; e-mail: petr.mikhailov.49@mail.ru; г. Пенза, Байдукова пр-д, 1а; тел.: 89273288810; ген. директор ООО НПЦ «КИТ»; кафедра ИТС; д.т.н.; профессор.

**Мокров Евгений Алексеевич** – e-mail: kitem-12@mail.ru; гл. конструктор ООО НПЦ «КИТ»; кафедра приборостроения; д.т.н.; профессор.

**Mikhailov Peter Grigor'evich** – Penza State Technological University; e-mail: pit\_mix@mail.ru; 1a, Baidukov pr., Penza, Russia; phone: +79273288810; generally director NPTS "KIT"; dr. of eng. sc.; professor.

**Mokrov Evgeni Alexandrovich** – e-mail: kitem-12@mail.ru; ch. designer NPTS "KIT" dr. of eng. sc.; professor

УДК 621.315.592:546.28

**К.А. Ожикенов, П.Г. Михайлов, А.О. Касимов, А.У. Аналиева**

### **УЗЛЫ И КОМПОНЕНТЫ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ\***

*Без датчиков и измерительных преобразователей невозможно создавать современные объекты и системы в различных областях науки, техники и технологии. Особую роль в настоящее время играют новое поколение датчиков – микроэлектронные, которые изго-*

---

\* Статья подготовлена в рамках выполнения проекта «Разработка беспроводной распределенной системы мониторинга загрязнения сбросовых сточных вод антибиотиками и агрессивными лекарственными препаратами», в соответствии с Приказом Председателя Комитета науки МОН РК №17-нж от 08.04.2013 г.