

**МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЕМКОСТНЫХ НАНО- И
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ДАТЧИКОВ
НА ИХ ОСНОВЕ**

Е. М. БЕЛОЗУБОВ*, Н. Е. БЕЛОЗУБОВА*, В. А. ВАСИЛЬЕВ**

* Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

** Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: opto@bk.ru

Предложен метод уменьшения температурной погрешности тонкопленочных емкостных нано- и микроэлектромеханических систем, а также датчиков на их основе.

Ключевые слова: тонкопленочные емкостные нано- и микроэлектромеханические системы, датчик давления, температура.

The method of minimization of temperature error of thin-film capacitance nano- and microelectromechanical systems as well as based on them is suggested.

Key words: thin-film capacitance nano- and microelectromechanical systems (N & MEMS), pressure sensor, temperature.

Температура – наиболее часто встречающийся фактор, вызывающий появление погрешностей датчиков (первичных преобразователей информации) различных физических величин: давления, силы, перемещения и т. д. Существуют различные методы уменьшения температурных погрешностей, а создание более совершенных измерительных устройств требует системного подхода к анализу и синтезу преобразователей информации [1].

Задача уменьшения температурной погрешности и восстановления информации может решаться как в первичных, так и во вторичных преобразователях. Однако предпочтительнее получать решение на начальном этапе преобразования, т. е. непосредственно в нано- и микроэлектромеханических системах (НиМЭМС) датчиков [1 – 3].

В тонкопленочных емкостных НМЭМС датчиков давления для минимизации влияния температуры на выходной сигнал вместе с измерительными используются опорные и термозависимые емкости [4]. Их введение вызвано необходимостью более точной компенсации влияния температуры на системы. Применение подобных емкостей является подтвердившим свою эффективность направлением улучшения температурных характеристик тонкопленочных емкостных НМЭМС и датчиков [4 – 6]. В то же время это требует усложнения конструкции и технологии изготовления самих систем. Анализ существующих конструкций НМЭМС показал, что при системном подходе открывается возможность их совершенствования в части уменьшения общего количества используемых емкостей совмещением функций термозависимой, опорной и термозависимой емкостей.

На рис. 1 показана разработанная тонкопленочная емкостная НМЭМС датчика давления, минимизирующая влияние температур указанным способом. Соотношения размеров зазора и других элементов конструкции для наглядности изменены. Диэлектрическая пленка

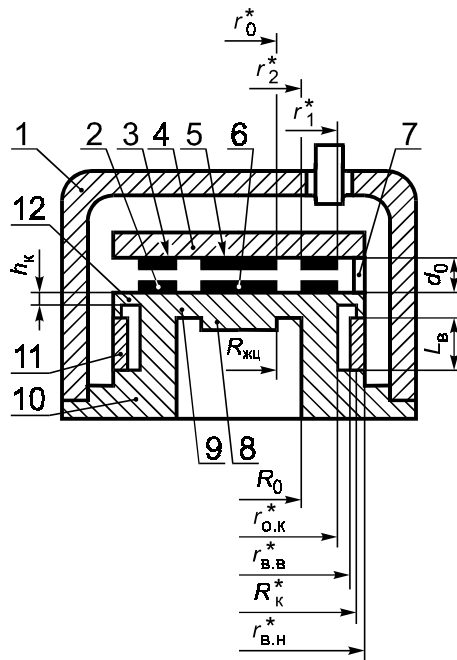


Рис. 1. Тонкопленочная емкостная НМЭМС датчика давления:

1 – корпус; 2, 3, 5, 6 – пары противолежащих электродов; 4 – диск; 7 – установочная прокладка; 8 – жесткий центр; 9 – мембрана; 10 – опорное основание; 11 – дополнительная втулка; 12 – периферийный консольный участок; r_0^* – радиус электрода измерительного конденсатора; r_1^* , r_2^* – внутренний и наружный радиусы электрода опорного конденсатора; d_0 – толщина установочной прокладки; $L_в$ – высота дополнительной втулки; $R_{жц}$ – радиус жесткого центра; $r_{о.к}^*$ – радиус основания; $h_к$, $R_к^*$ – толщина и радиус консольного участка; $r_{в.н}^*$, $r_{в.в}^*$ – наружный и внутренний радиусы втулки

между электродами и другими элементами конструкции не показана. Толщины электродов для наглядности увеличены в 500 раз.

Система состоит из корпуса 1, мембраны 9 с жестким центром 8, выполненной как одно целое с опорным основанием 10 с образованием периферийного консольного участка 12, диска 4, расположенного с зазором относительно мембраны, установочных прокладок 7, находящихся на периферии консольного участка. Емкостный преобразователь деформаций выполнен в виде двух пар противолежащих электродов 6, 5 и 2, 3, расположенных по центру и на недеформируемой части мембраны и диска, соответственно. Дополнительная втулка 11 жестко закреплена противолежащими торцами на опорном основании и консольном участке. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) втулки не равен ТКЛР материала основания и мембраны. Мембрана, опорное основание и консольный участок выполнены из сплава 70НХБМЮ, втулка – из сплава 12Х18Н10Т. Для удобства сборки втулка сделана из двух полуколец. На мембрану и диск нанесен слой диэлектрика в виде композиции $Al_2O_3 - SiO_2$ общей толщиной 3 мкм. Электроды расположены на диэлектрике и состоят из композиции ванадий – никель толщиной 70 нм. Внутренняя полость НиМЭМС герметизирована и вакуумирована [7].

Система работает следующим образом. При воздействии измеряемого давления жесткий центр 8 мембраны 9 перемещается в сторону диска 4. В результате емкость измерительного конденсатора увеличивается. Емкость опорного конденсатора при размещении его электрода на недеформируемой части мембраны не зависит от измеряемого давления. При изменении рабочей температуры термически меняются размеры радиусов жесткого центра 8, мембраны 9, толщин мембраны и прокладок, высоты втулки 11, а также модуля упругости материала мембраны 9. Из-за неравенства ТКЛР втулки 11 и материала мембраны консольный участок 5, жестко с ней связанный, поднимается или опускается относительно поверхности мембраны. В результате диск 4 и электроды, размещенные на нем, перемещаются относительно электродов измерительного и опорного конденсаторов, расположенных на мембране, что приводит к изменению их емкостей. Благодаря выполнению элементов конструкции в соответствии с определенным соотношением высота втулки меняется на величину, необходимую для обеспечения независимости отношения емкостей опорного и измерительного конденсаторов от температуры [7].

Определим соотношения между элементами конструкции, при которых будет осуществляться минимизация температурного влияния. В реальных конструкциях тонкопленочных НиМЭМС толщина электродов примерно в 500 – 1000 раз меньше расстояния между мембраной и диском, поэтому расстояние между электродами принимается равным расстоянию между мембраной и диском, которое при отсутствии деформаций от воздействия измеряемого давления или температуры равно толщине установочной прокладки. С учетом того, что внутренняя полость НиМЭМС вакуумирована, емкости опорного конденсатора при температурах T_0 , T равны соответственно

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{d_0}; \quad C_{0T} = \varepsilon_0 \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)(1 + \alpha_y \Delta T)^2}{d_0(1 + \alpha_n \Delta T) + L_b(\alpha_b - \alpha_y)\Delta T},$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; r_1, r_2 – внутренний и наружный радиусы электрода опорного конденсатора; d_0 – толщина установочной прокладки; $\alpha_n, \alpha_b, \alpha_y$ – ТКЛР материала установочной прокладки, втулки, упругого элемента, соответственно; $\Delta T = T - T_0$; L_b – высота дополнительной втулки.

Емкости измерительного конденсатора при T_0, T соответственно равны

$$C_x = \varepsilon_0 \pi r_0^2 / d_0; \quad C_{xT} = \varepsilon_0 \frac{\pi r_0^2 (1 + \alpha_y \Delta T)^2}{d_0(1 + \alpha_n \Delta T) + L_b(\alpha_b - \alpha_y)\Delta T},$$

где r_0 – радиус электрода измерительного конденсатора.

Тогда отношения емкостей опорного и измерительного конденсаторов при T_0, T составят

$$C_0/C_x = (r_2^2 - r_1^2)/r_0^2; \quad C_{0T}/C_{xT} = (r_2^2 - r_1^2)/r_0^2.$$

Без воздействия давления данные отношения не зависят от температуры, т. е. $C_0/C_x = C_{0T}/C_{xT}$, что говорит о равенстве нулю аддитивной температурной погрешности НиМЭМС.

Для обеспечения минимального значения мультипликативной температурной погрешности необходимо выполнение условия

$$C_0/C_{xp} = C_{0T}/C_{xpT}, \quad (1)$$

где C_{xp}, C_{xpT} – емкости измерительного конденсатора при воздействии измеряемого давления соответственно при температурах T_0, T ,

$$C_{xp} = \varepsilon_0 \frac{\pi r_0^2}{d_0 - \omega_0}; \quad C_{xpT} = \varepsilon_0 \frac{\pi r_0^2 (1 + \alpha_y \Delta T)^2}{d_0 (1 + \alpha_n \Delta T) + L_b (\alpha_b - \alpha_y) \Delta T - \omega_{0T}}. \quad (2)$$

Здесь ω_0, ω_{0T} – прогибы жесткого центра под воздействием измеряемого давления при температурах T_0, T , равные [8]:

$$\omega_0 = A_{p0} \frac{PR_0^4}{E_0 h_0^3}; \quad \omega_{0T} = A_{pT} \frac{PR_T^4}{E_T h_T^3},$$

$$\text{где } A_{p0} = \frac{3(1 - \mu_0^2)}{16} \frac{C^4 - 1 - 4C^2 - \ln C}{C^4}; \quad A_{pT} = \frac{3(1 - \mu_T^2)}{16} \frac{C^4 - 1 - 4C^2 - \ln C}{C^4};$$

R_0, R_T, h_0, h_T – радиусы и толщины мембраны при температурах T_0, T ; E_0, E_T, μ_0, μ_T – модули упругости и коэффициенты Пуассона материала мембраны при T_0, T ; $C = R_0/R_{жц}, R_{жц}$ – радиус жесткого центра.

Так как величина C представляет собой отношение радиусов мембраны и жесткого центра, их термические расширения в приведенном выше выражении взаимно компенсируются за счет деления. Учитывая, что значение коэффициента Пуассона в квадрате не менее чем на порядок меньше единицы, можно со сравнительно небольшой погрешностью пренебречь его температурным изменением. Тогда $A_{p0} = A_{pT}$, и (1), (2) запишем в виде следующих выражений

$$\frac{C_0}{C_{xp}} = \frac{\varepsilon_0 \pi (r_2^2 - r_1^2) \left[d_0 - A_{p0} \left(PR_0^4 / E_0 h_0^3 \right) \right]}{d_0 \varepsilon_0 \pi r_0^2}, \quad (3)$$

$$\frac{C_{0T}}{C_{xpT}} = \frac{\varepsilon_0 \pi (r_2^2 - r_1^2) (1 + \alpha_y \Delta T)^2 d_0 (1 + \alpha_n \Delta T) + \alpha_b (\alpha_b - \alpha_y) \Delta T - A_{p0} \frac{PR_0^4 (1 + \alpha_y \Delta T)}{E_0 (1 + \beta \Delta T) h_0^3}}{d_0 (1 + \alpha_n \Delta T) + L_b (\alpha_b - \alpha_y) \Delta T \varepsilon_0 \pi r_0^2 (1 + \alpha_y \Delta T)}. \quad (4)$$

Приравняв выражения (3), (4), получим

$$\begin{aligned} \frac{d_0 - A_{p0} \left(PR_0^4 / E_0 h_0^3 \right)}{d_0} = \\ = \frac{d_0 (1 + \alpha_n \Delta T) + \alpha_b (\alpha_b - \alpha_y) \Delta T - A_{p0} \frac{PR_0^4 (1 + \alpha_y \Delta T)}{E_0 (1 + \beta \Delta T) h_0^3}}{d_0 (1 + \alpha_n \Delta T) + L_b (\alpha_b - \alpha_y) \Delta T}. \end{aligned}$$

Итогом преобразований будет выражение, характеризующее первое условие минимизации температурной погрешности ННМЭМС

$$\alpha_B = \frac{d_0 \left[\left[(\alpha_y - \beta) / (1 + \beta \Delta T) \right] - \alpha_{\Pi} \right]}{\alpha_B - \alpha_y}. \quad (5)$$

Наибольшие напряжения на наружном и внутреннем контурах консольного участка равны [7]

$$\sigma_{\Gamma H} = B_{\Theta H} \frac{E_K h_K \omega_{0K}}{R_K^2}; \sigma_{\Gamma B} = B_{\Theta B} \frac{E_K h_K \omega_{0K}}{R_K^2},$$

$$\text{где } B_{\Theta H} = \frac{r}{1 - \mu_K^2} \frac{C_K^2 (C_K^2 - 1 - 2 \ln C_K)}{(C_K^2 - 1)^2 - 4 C_K^2 \ln^2 C_K}; B_{\Theta B} = \frac{r}{1 - \mu_K^2} \frac{C_K^2 (2 C_K^2 \ln C_K - C_K^2 + 1)}{(C_K^2 - 1)^2 - 4 C_K^2 \ln^2 C_K},$$

$C_K = R_K / r_{0K}$, r_{0K} – радиус основания; E_K , h_K , R_K , ω_{0K} – модуль упругости, толщина, радиус и прогиб консольного участка, соответственно.

С учетом того, что прогиб консольного участка

$$\omega_{0K} = A_{0K} \frac{\Theta R_K^2}{E_K h_K^3},$$

$$\text{где } A_{\Theta} = \frac{3(1 - \mu^2)}{\pi} \left(\frac{C_K^2 - 1}{4 C_K^2} - \frac{\ln C_K}{C_K^2 - 1} \right); \Theta - \text{усилие, действующее на консоль-}$$

ный участок, можно записать выражения для напряжений в консольном участке в виде

$$\sigma_{\Gamma H} = (A_{\Theta} B_{\Theta H} \Theta) / h_K^2, \sigma_{\Gamma B} = (A_{\Theta} B_{\Theta B} \Theta) / h_K^2.$$

Для устранения влияния деформаций втулки на деформацию консольного участка необходимо, чтобы напряжения во втулке были не менее чем на два порядка меньше напряжений в консольном участке, т.е. $\sigma_B \leq 0,01 \sigma_{\Gamma H}$, $\sigma_B \leq 0,01 \sigma_{\Gamma B}$.

Напряжения во втулке

$$\sigma_B = \Theta / \left[\pi (r_{B.H}^2 - r_{B.B}^2) \right],$$

где $r_{B.H}$, $r_{B.B}$ – наружный и внутренний радиусы втулки.

Подставив значения напряжений в неравенства, получим

$$\frac{\Theta}{\pi (r_{B.H}^2 - r_{B.B}^2)} \leq 0,01 \frac{A_{\Theta} B_{\Theta H} \Theta}{h_K^2}; \frac{\Theta}{\pi (r_{B.H}^2 - r_{B.B}^2)} \leq 0,01 \frac{A_{\Theta} B_{\Theta B} \Theta}{h_K^2}.$$

Отсюда после преобразования выведем выражения, характеризующие вторые условия минимизации температурной погрешности НиМЭМС:

$$h_k \leq \sqrt{0,01 A_{\Theta} B_{\Theta B} (r_{B.H}^2 - r_{B.B}^2)}; \quad h_k \leq \sqrt{0,01 A_{\Theta} B_{\Theta H} (r_{B.H}^2 - r_{B.B}^2)}. \quad (6)$$

Например, при $d_0 = 40$ мкм; $\alpha_y = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $\beta = -300 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$; $\alpha_B = 18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $\Delta T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $L_B = 2,65$ мм; $r_{B.H} = 5$ мм; $r_{B.B} = 3,7$ мм; $R_K = 4,5$ мм; $r_{0K} = 3,5$ мм; $h_K \leq 0,2$ мм; $h_K \leq 0,22$ мм.

Таким образом, при соблюдении условий (5), (6) выполняется минимизация влияния температур в НиМЭМС, изображенной на рис. 1.

Для определения дополнительных условий минимизации рассмотрим фрагмент НиМЭМС, изображенный на рис. 2.

При $\alpha_y > \alpha_B$ (рис. 2, а) длина втулки должна быть, с одной стороны, максимальна для увеличения чувствительности C_0 к температуре, а с другой – такой, чтобы при воздействии максимальных эксплуатационной температуры и измеряемого давления между электродами оставался минимально допустимый межэлектродный зазор d_{0min} (рис. 2, б). Следовательно, можно записать

$$d_{0min} = d_0 - L(\alpha_y - \alpha_B)(T - T_0) - \omega_0.$$

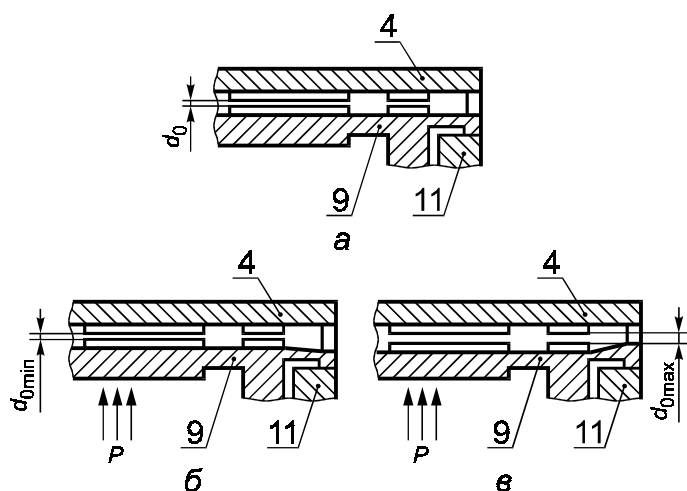


Рис. 2. Фрагмент тонкопленочной емкостной НиМЭМС датчика давления:

d_{0min} , d_{0max} – минимально и максимально допустимые межэлектродные зазоры; остальные обозначения те же, что на рис. 1

Проведя необходимые преобразования, получим соотношение, характеризующее третье условие минимизации температурной погрешности НиМЭМС:

$$L = \frac{d_0 - \omega_0 - d_{0\min}}{(\alpha_y - \alpha_b)(T - T_0)}. \quad (7)$$

Выражение (7) определяет необходимую длину втулки. При большей длине возможно замыкание электродов при максимальной измеряемой температуре, а при меньшей – зависимость C_0 от температуры не будет максимальной.

При $\alpha_y < \alpha_b$ (рис. 2, в) критерием правильности выбора длины втулки служит допустимое уменьшение емкости C_0 с увеличением температуры. Действительно, этот процесс оправдан только до определенного значения $C_{0\min}$, так как вследствие гиперболической зависимости емкости от зазора дальнейшее его уменьшение приводит к все меньшему изменению C_0 (в данном случае при температуре T) (рис. 2, в). Тогда при гиперболическом характере зависимости емкости от зазора

$$C_{0\max}/C_{0\min} = d_{0\max}/d_0 \quad \text{или} \quad d_{0\max} = d_0 \frac{C_{0\max}}{C_{0\min}}.$$

где $d_{0\max}$ – максимально допустимый межэлектродный зазор.

$$\text{Так как } d_{0\max} = d_0 + L(\alpha_b - \alpha_y)(T - T_0), \text{ то } d_0 + L(\alpha_b - \alpha_y)(T - T_0) = d_0 \frac{C_{0\max}}{C_{0\min}}.$$

Отсюда

$$L = \left[d_0 \left[(C_{0\max}/C_{0\min}) - 1 \right] \right] / [(\alpha_y - \alpha_b)(T - T_0)]. \quad (8)$$

Выражение (8) – вариант третьего условия (7) минимизации температурной погрешности НиМЭМС. В отличие от (7) оно позволяет определять необходимую длину втулки в зависимости от емкостей опорного конденсатора. Если при $\alpha_y < \alpha_b$ длина втулки будет меньше установленного соотношением (8) значения, то изменение емкости C_0 от температуры будет меньше оптимальной, если больше, то изменение температуры на определенном этапе не приведет к заметному изменению емкости. Очевидно, что все соотношения и условия, полученные

при рассмотрении тонкопленочных емкостных НиМЭМС датчиков давления, будут также справедливы и для остальных НиМЭМС.

Температурная погрешность экспериментальных образцов датчиков давления, изготовленных в НИИФИ с использованием выполненных в соответствии с предлагаемыми решениями тонкопленочных емкостных НиМЭМС, не превышает $2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ в температурном диапазоне $25 - 727 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как датчики давления, изготовленные без учета установленных соотношений, имеют температурную погрешность $16 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ в диапазоне $25 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В связи с изложенным выше сформулируем метод уменьшения температурной погрешности тонкопленочных емкостных НиМЭМС датчиков физических величин, реализуемый совмещением функций термозависимой, опорной и измерительной емкостей и заключающийся в выполнении опорной и измерительной емкостей зависимыми от температуры и обеспечении независимости отношения емкостей опорного и измерительного конденсаторов от температуры при отсутствии и при воздействии измеряемого давления.

Таким образом, с использованием системного подхода, путем совмещения функций термозависимой, опорной и измерительной емкостей в тонкопленочной емкостной НиМЭМС представляется возможным уменьшить в восемь раз температурную погрешность в широком диапазоне температур. При этом обеспечивается компенсация как аддитивной, так и мультипликативной составляющих погрешности. Кроме того, предлагаемый метод вследствие исключения одной из трех емкостей позволяет существенно упростить конструкцию, технологию изготовления и повысить экономические характеристики датчиков на основе тонкопленочных емкостных НиМЭМС.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Белозубов Е. М., Васильев В. А.** Нано- и микроэлектромеханические системы тонкопленочных датчиков давления. Принципы построения и перспективы использования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 9. С. 26 – 32.

2. **Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В.** Тонкопленочные нано- и микроэлектромеханические системы – основа современных и перспективных датчиков давления для ракетной и авиационной техники // Измерительная техника. 2009. № 7. С 35 – 38; **Belozubov E. M., Vasil'ev V. A.,**

Gromkov N. V. Thin-film nano- and micro-electromechanical systems – the basis of contemporary and future pressure sensors for rocket and aviation engineering // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 7. P. 739 – 744.

3. **Белозубов Е. М., Васильев В. А., Громков Н. В.** Проблемы и основные направления исследований тонкопленочных нано- и микроэлектромеханических систем датчиков давления // Датчики и системы. 2009. № 8. С. 54 – 58.

4. **Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е.** Тонкопленочные емкостные МЭМС-структуры с минимизацией влияния температур для датчиков давления // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 10. С. 42 – 47.

5. **Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е.** Повышение термостойкости тонкопленочных емкостных МЭМС-структур // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 7. С. 41 – 44.

6. **Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А.** Тонкопленочные микроэлектромеханические системы и датчики на их основе // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 33 – 39.

7. **Пат. 2010197 РФ.** Датчик давления / Е. М. Белозубов // Бюл. изобрет. 1994. № 6.

8. **Пономарев С. Д., Андреева Л. Е.** Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980.

Дата принятия 27.12.2011 г.

