

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР КНС. ОДНОМЕМБРАННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

А. И. Козлов, А. В. Пирогов, В. М. Стучебников

Методом конечных элементов проведен расчет напряженного состояния поверхности чувствительных элементов (ЧЭ) на основе структур КНС в двухслойных тензопреобразователях (ТП) давления одномембранного типа и соответствующих изменений сопротивления тензорезисторов, расположенных на ЧЭ. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными и могут быть использованы для оптимизации характеристик ТП.

Тензопреобразователи (ТП) давления на основе тензочувствительных элементов, изготовленных из гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире" (КНС), обладают рядом преимуществ в сравнении с другими микроэлектронными тензорезисторными преобразователями [1]. В таких ТП чувствительный элемент (ЧЭ) жестко соединен с титановой упругой мембраной, выполненной заодно с кольцевым основанием. Упругая мембрана воспринимает либо непосредственно давление измеряемой среды, либо усилие от приемной мембраны, соединенной с упругой мембраной штоком (рис. 1). Такая конструкция позволяет выпускать ТП на различные пределы измерения (в ПГ МИДА — от 4 кПа до 250 МПа [2]), используя один и тот же плоский чувствительный элемент из КНС и изменяя лишь геометрию упругой и приемной мембран.

Широкий диапазон измеряемых давлений обуславливает изменение геометрических параметров упругой и приемной мембран также в широких пределах. Вместе с тем эти размеры должны быть такими, чтобы обеспечить наилучшие

метрологические характеристики ТП (максимум чувствительности, минимум основной и дополнительной погрешностей) при одной и той же топологии тензочувствительной схемы. В частности, для получения максимальной чувствительности ТП необходимо, чтобы тензорезисторы мостовой схемы находились в зоне максимальной деформации, вызванной измеряемым давлением. Такое расположение тензорезисторов обеспечивает и минимальное значение вариации выходного сигнала ТП. Кроме того, при проектировании топологии тензосхемы необходимо добиваться и минимальной дополнительной температурной погрешности ТП, вызванной, в частности, термической деформацией ЧЭ из-за различия в коэффициентах теплового расширения сапфира и титана.

Расчетное определение зоны оптимального расположения тензорезисторов на ЧЭ представляет собой непростую задачу, поскольку напряженное состояние поверхности трехслойной мембраны (титан, припой, сапфир) сложного профиля не описывается аналитически. Классическая модель распределения деформаций в плоской

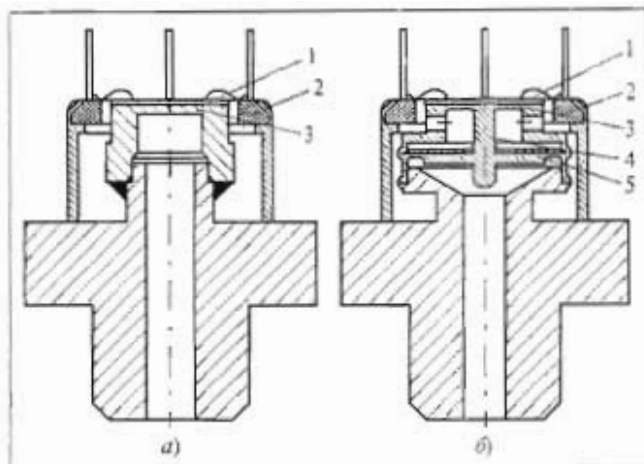


Рис. 1. Одномембранный (а) и двумембранный (б) тензопреобразователи давления [2]:

1 — сапфировый элемент с кремниевой тензочувствительной схемой; 2 — коллектор; 3 — упругая титановая мембрана; 4 — соединительный шток; 5 — приемная мембрана

мембране, жестко заземленной по контуру [3], неплохо описывает свойства интегральных кремниевых ТП давления, полученных анизотропным травлением [4, 5], однако она практически неприменима для ТП на основе КНС. Хотя этой моделью пользуются (неправоммерно) до настоящего времени при проектировании, например, тонкопленочных датчиков давления [6], но, как было показано еще в работе [7], реальное распределение деформаций на поверхности упругой мембраны достаточной толщины, выполненной заодно с кольцевым основанием, значительно отличается от классического.

В настоящей работе приведены результаты математического моделирования напряженного состояния поверхности чувствительных элементов

одномембранных ТП давления на основе структур КНС. Расчеты сравниваются с экспериментальными измерениями распределения чувствительности тензорезисторов по поверхности ЧЭ.

Расчет напряженного состояния проводился методом конечных элементов для конкретных типов ТП с учетом влияния формы штуцера и сварных швов конструкции. На рис. 2, б, показан типичный результат расчета разности $\Delta \epsilon$ радиальных и тангенциальных деформаций на поверхности чувствительного элемента ТП, возникающих под действием измеряемого давления (именно разность радиальных и тангенциальных деформаций поверхности ЧЭ определяет изменение сопротивлений тензорезисторов). Видно, что в реальном одномембранном ТП давления экстремум разности деформаций находится в основном за краем мембраны на "жестком" кольце, и тем дальше от края мембраны, тем больше ее толщина. Одновременно вид экстремума с увеличением толщины мембраны становится все более размытым; наконец, при достаточно большой толщине мембраны экстремум исчезает совсем. Это распределение резко отличается от распределения деформаций, рассчитанного по классической модели для плоской мембраны, жестко заземленной по контуру (рис. 2, а).

Для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными было рассчитано распределение по поверхности ЧЭ чувствительности точечных тензорезисторов, ориентированных по кристаллографическим направлениям (110) кремния вдоль и поперек радиуса мембраны ТП. Экспериментально это распределение определялось с помощью специальной тестовой структуры (рис. 3) с короткими тензорезисторами, расположенными по диаметру мембраны и ориентирован-

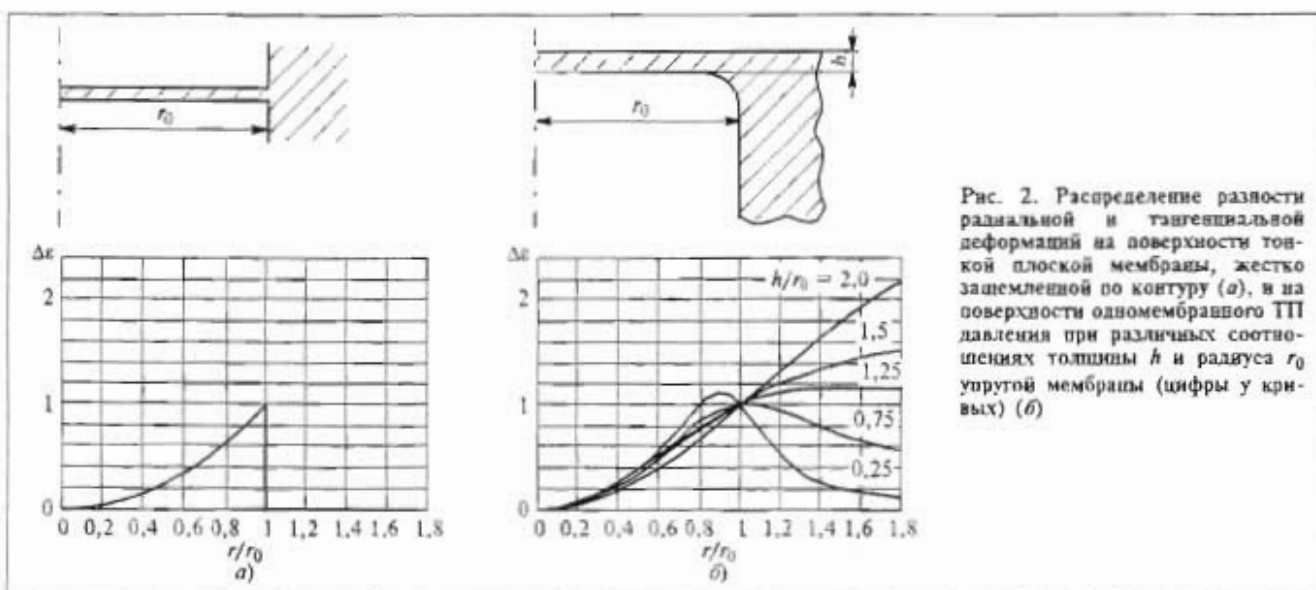


Рис. 2. Распределение разности радиальной и тангенциальной деформаций на поверхности тонкой плоской мембраны, жестко заземленной по контуру (а), и на поверхности одномембранного ТП давления при различных соотношениях толщины h и радиуса r_0 упругой мембраны (цифры у кривых) (б)



Рис. 3. Тестовая структура на поверхности сапфирового чувствительного элемента ТП давления с титановой упругой мембраной

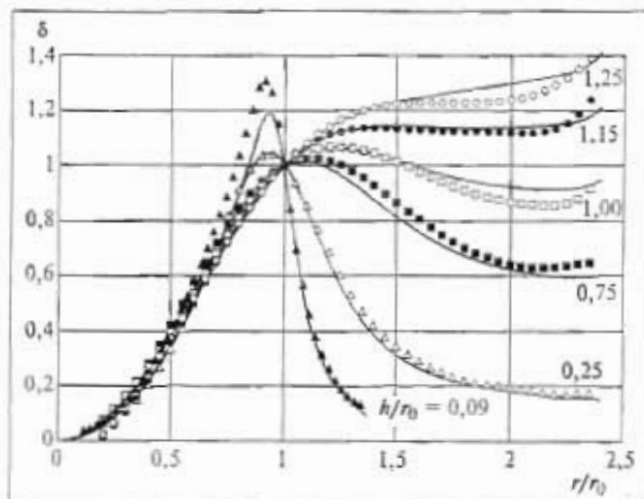


Рис. 4. Распределение разности чувствительностей продольных и поперечных тензорезисторов по радиусу ТП (в относительных единицах):

точки — эксперимент; кривые — расчет; цифры у кривых соответствуют отношению толщины мембраны к ее радиусу

ными по кристаллографическим направлениям (110) кремния вдоль и поперек радиуса (именно так ориентированы тензорезисторы в мостовой схеме ТП). Сопротивления тензорезисторов измерялись потенциометрическим методом с помощью системы сбора данных Agilent 34970A с погрешностью не больше 0,01 %. Давление задавалось грузопоршневыми манометрами класса 0,05; измерения проводились в диапазоне 20...180 °С.

Для мостовой тензосхемы с одинаковыми начальными значениями сопротивлений радиальных R_r и тангенциальных R_t тензорезисторов ($R_r|_{p=0} = R_t|_{p=0} = R_0$ — мост сбалансирован при отсутствии давления p) выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ при питании моста постоянным напряжением $U_{\text{пит}}$ равен:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}}(\Delta R_r - \Delta R_t)/(2R_0 + \Delta R_r + \Delta R_t) \approx \approx U_{\text{пит}}(\Delta R_r - \Delta R_t)/2R_0, \quad (1)$$

где ΔR_r и ΔR_t — изменения сопротивления соответствующих тензорезисторов под действием дав-

ления, которые для указанной ориентации тензорезисторов в мостовой схеме ТП давления на основе КНС близки по абсолютной величине и противоположны по знаку. Поэтому наиболее информативным параметром с точки зрения проектирования ТП является полуразность относительных изменений сопротивлений радиальных и тангенциальных тензорезисторов:

$$\delta = 1/2(\Delta R_r/R_0 - \Delta R_t/R_0). \quad (2)$$

На рис. 4 показаны результаты экспериментального определения распределения величины δ по поверхности ЧЭ с различным отношением толщины упругой мембраны h к ее радиусу r_0 вместе с результатами моделирования. Как видно из рисунка, экстремум величины δ находится вблизи края мембраны только при малых ее толщинах ($h/r_0 < 0,7$), а при больших толщинах мембраны максимум смещается за ее границу и расплывается. Наконец, при достаточной толщине мембраны ($h/r_0 > 1,2$) максимум исчезает, и основной вклад в деформацию поверхности ЧЭ вносят боковые стенки основания мембраны. Видно также, что теоретический расчет хорошо согласуется с экспериментом; это позволяет с хорошей точностью рассчитывать геометрические параметры одномембранного ТП для достижения максимальной чувствительности при заданном измеряемом давлении.

Результаты и расчета, и эксперимента показали, что смещение экстремума чувствительности мостовой тензосхемы δ от края мембраны не описывается простой формулой, предложенной в работах [7, 8], в которой учитывается только толщина мембраны. На рис. 5 приведены результаты мо-

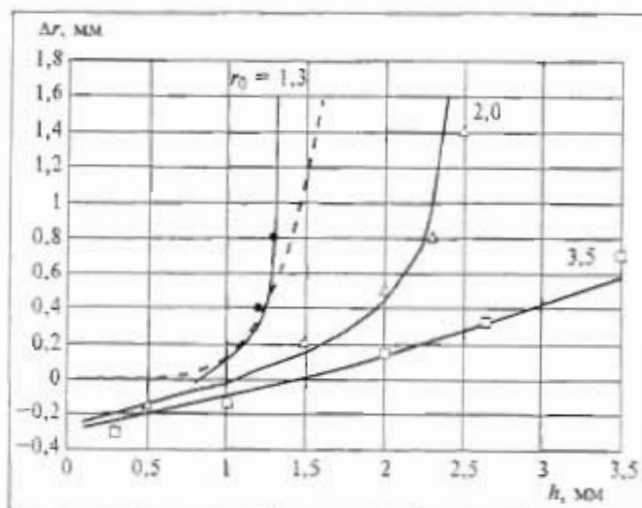


Рис. 5. Смещение положения максимума разности чувствительностей продольных и поперечных тензорезисторов от края упругой мембраны в зависимости от толщины мембраны при различных радиусах мембраны (цифры у кривых):

● — данные работы [7]; сплошные кривые — расчет; пунктирная кривая построена по формуле из работы [7]

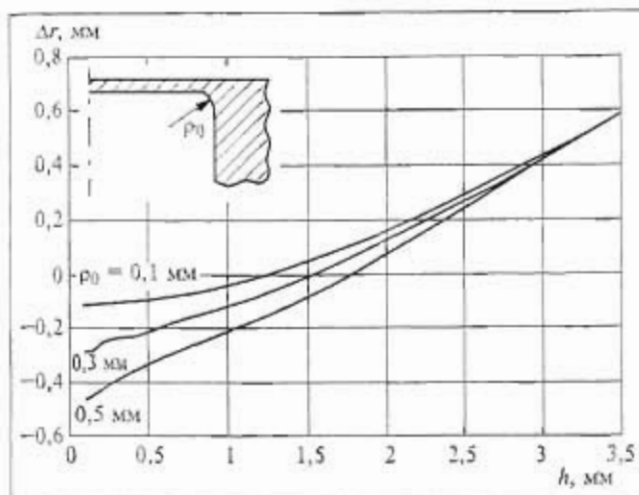


Рис. 6. Влияние величины радиуса скругления ρ_0 на положение максимума разности чувствительностей продольных и поперечных тензорезисторов

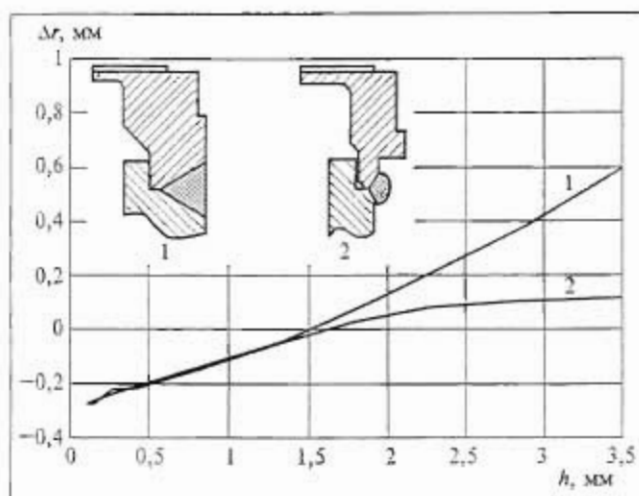


Рис. 7. Влияние вида сварного соединения упругой мембраны со штуцером (1 — сварка «по катету», 2 — сварка «в ус») на положение максимума разности чувствительностей продольных и поперечных тензорезисторов

делирования и экспериментальных измерений смещения максимума δ при различных толщинах и радиусах мембраны ТП. Там же приведены экспериментальные результаты и график формулы из работы [7]. Видно, что хотя эти результаты неплохо согласуются с нашим расчетом, но эмпирической формулой, приведенной в работах [7, 8],

пользоваться для практических расчетов топологии тензосхемы при произвольных значениях параметров упругой мембраны нельзя.

Расчет (и эксперимент) показывает также, что на распределение чувствительности тензорезисторов по поверхности ЧЭ существенное влияние оказывают величина радиуса скругления ρ_0 между внутренним краем мембраны и боковой стенкой основания (рис. 6), а также форма штуцера ТП и свойства узла крепления основания упругой мембраны к штуцеру (рис. 7). Поэтому для достижения хорошей воспроизводимости метрологических характеристик необходимо достаточно жестко контролировать эти параметры при изготовлении металлической части ТП.

Указанное распределение напряжений по поверхности чувствительного элемента необходимо учитывать при проектировании ТП давления на основе структур КНС с наилучшими метрологическими характеристиками. В качестве примера в таблице приведены характеристики двух типов ТП давления на один и тот же диапазон измерений. Первый тип ТП спроектирован согласно результатам работ [7, 8] (и выпускался серийно), второй — оптимизирован в соответствии с полученными в настоящей работе результатами. Видно, что при примерно одинаковых значениях нелинейности преобразования вариация оптимизированных ТП уменьшилась более чем вдвое (из-за снижения максимальной деформации упругой мембраны при том же значении выходного сигнала).

Если сопротивления тензорезисторов в мостовой схеме по-разному изменяются с температурой, то, как следует из формулы (1), температурная зависимость начального выходного сигнала ТП (при давлении, равном нулю) определяется разностью температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) радиальных α_{R_r} и тангенциальных α_{R_t} тензорезисторов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_0(T)}{\partial T} &= U_{\text{пит}} \left(\frac{\partial R_r}{R_r \partial T} - \frac{\partial R_t}{R_t \partial T} \right) = \\ &= U_{\text{пит}} (\alpha_{R_r} - \alpha_{R_t}). \end{aligned} \quad (3)$$

Разница в ТКС возникает в результате анизотропии термической деформации сапфира из-за большого различия коэффициентов теплового

Параметры серийных и оптимизированных одномембранных ТП давления

Параметр	Тип ТП					
	4		40		60	
	1	2	1	2	1	2
Диапазон измерения, МПа						
Выходной сигнал, мВ	79,2	82,1	46,5	60,4	68,3	68,8
Нелинейность, %	0,10	0,08	0,05	0,07	0,07	0,07
Вариация, %	0,017	0,006	0,049	0,019	0,050	0,013

расширения сапфира и титанового сплава. На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости разности ТКС радиальных и тангенциальных тензорезисторов $\Delta\alpha_R = (\alpha_{Rr} - \alpha_{Rt})$ в зависимости от их положения на чувствительном элементе ТП. Аналогичные результаты получены в работе [9]. В ней утверждается, что вид зависимости $\Delta\alpha_R(r)$ существенно изменяется при изменении толщины титановой мембраны: чем толще упругая мембрана, тем больше величина $\Delta\alpha_R$ на одном и том же расстоянии от центра мембраны. Наши результаты показывают, что это не совсем так: при изменении толщины упругой мембраны в достаточ-

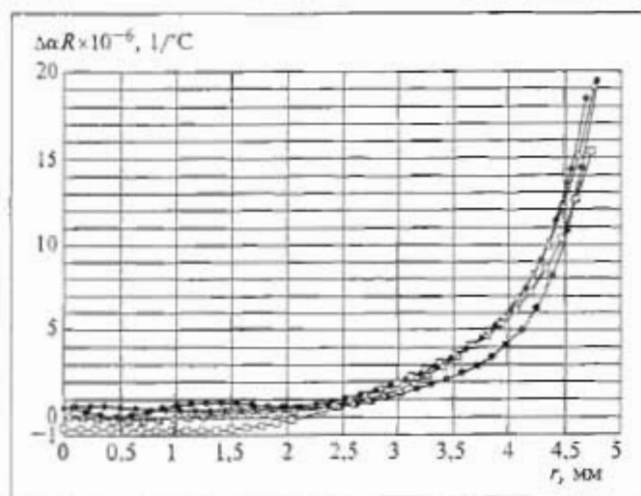


Рис. 8. Зависимость разности ТКС радиальных и тангенциальных тензорезисторов от расстояния до центра ПЧЭ при разных значениях h/r_0 :
□ — 0,15; ● — 0,31; △ — 0,75; ◆ — 1,15

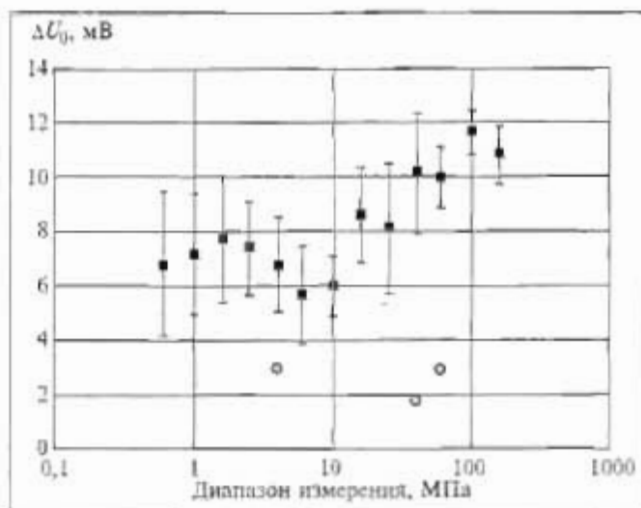


Рис. 9. Распределение абсолютных величин температурных дрейфов начального выходного сигнала ТП в диапазоне температур $-40...+80$ °С для серийных ТП МИДА с различными диапазонами измерения. Точками (○) показаны значения дрейфов ТП с модифицированной топологией

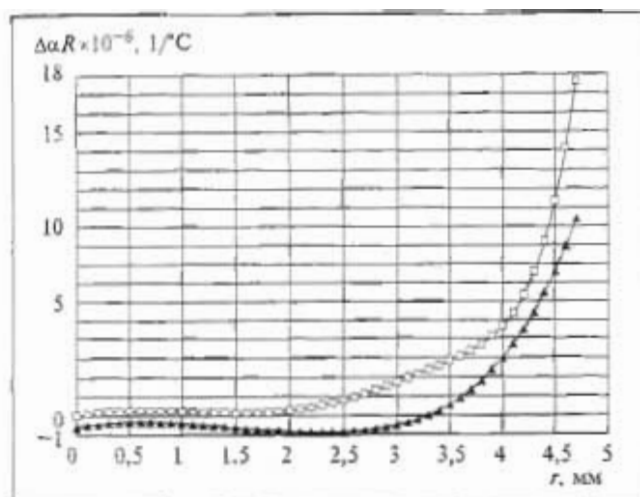


Рис. 10. Распределение разности температурных коэффициентов продольных и поперечных тензорезисторов на ТП при толщине сапфировой подложки:
□ — 0,12 мм и ▲ — 0,08 мм

но широких пределах зависимость $\Delta\alpha_R(r)$ практически не изменяется и только при довольно больших значениях толщины мембраны разность ТКС начинает увеличиваться. Это же следует и из опыта серийного производства ТП и датчиков давления МИДА: температурные дрейфы начального выходного сигнала ТП практически не зависят от диапазона измерения в интервале значений диапазонов измерения одномембранных ТП от 0,6 до 25 МПа (рис. 9), хотя отношение толщины упругой мембраны к ее радиусу изменяется при этом на порядок (от 0,03 до 0,30); только при больших толщинах мембраны температурный дрейф начинает расти. С другой стороны, на разность ТКС существенно влияет толщина ЧЭ (рис. 10); отсюда можно сделать вывод, что анизотропия термической деформации сапфирового чувствительного элемента определяется параметрами как титановой мембраны, так и самого чувствительного элемента.

Полученные результаты позволяют модифицировать топологию тензочувствительной мостовой схемы ТП давления для снижения температурной зависимости начального выходного сигнала (которая в значительной степени определяет температурную погрешность ТП давления). На рис. 9 показаны значения температурных дрейфов начального сигнала ТП со стандартной и оптимизированной топологией чувствительного элемента в диапазоне температур $-40...+80$ °С. Видно, что в результате оптимизации температурный дрейф снизился примерно втрое.

Таким образом, разработанная программа расчета геометрических параметров одномембранных ТП давления с тензочувствительными элементами на основе структур КНС позволяет про-

ектировать оптимизированные упругие мембраны ТП. Вместе с тем, опыт работы с программой и эксперимент показывают, что для достижения хорошей точности расчета необходимо учитывать не только параметры упругой мембраны, но и форму и размеры штуцера ТП, а также свойства узлов соединения мембраны со штуцером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стучебников В. М. Кремний на сапфире как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника. — 2005. — Т. 50. — № 6. — С. 678.
2. Бушев Е. Е., Николайчук О. Л., Стучебников В. М. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА // Датчики и системы. — 2000. — № 1. — С. 21.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1981. — 392 с.
4. Lee K., Wise K. D. SENSIM: a simulation program for solid-state pressure sensors // IEEE Trans. El. Dev. — 1982. — Vol. ED-29, N 1. — P. 34.
5. Eaton W. P., Bitisie F., Smith J. H., Plummer D. V. A new analytical solution for diaphragm deflection and its application to a surface-micromachined pressure sensor // Int. Conf. on Model. & Simulation of Microsystems MSM 99. — 1999.
6. Белозубов Е. М. Перспективные тонкопленочные тензорезисторные датчики давления для ракетной и авиационной техники // Измерительная техника. — 2004. — № 5. — С. 37
7. Черницын В. Н. Исследование распределения деформаций в упругих элементах мембранных тензопреобразователей // Тр. НИИТеплоприбора. — М., 1989. — С. 90.
8. А. с. СССР № SU 1525505 А1. Тензопреобразователь высокого давления / А. В. Белоглазов, В. И. Евдокимов и др. // Бюл. — 1989. — № 44.
9. Хасиков В. В., Суханов В. И., Резникова Н. Б. Исследование термических деформаций поверхности двухслойной мембраны преобразователя давления // Приборы и системы управления. — 1995. — № 9. — С. 12.

Работа представлена ЗАО "МИДАУС" (г. Ульяновск).

Александр Ипатьевич Козлов — инженер;

Александр Васильевич Пирогов — канд. физ.-мат. наук, вед. научн. сотрудник;

Владимир Михайлович Стучебников — д-р техн. наук, ген. директор.

☎ (8422) 34-95-18

E-mail: mida@mv.ru

