

Г. Г. БАБИЧЕВ, Э. А. ЗИНЧЕНКО, д. ф.-м. н. С. И. КОЗЛОВСКИЙ,
В. В. НЕДОСТУП, д. ф.-м. н. В. А. РОМАНОВ, Н. Н. ШАРАН

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева;
г. Винница, НИИ "Гелий"
E-mail: lab25@isp.kiev.ua, c_polus@svitonline.com

Дата поступления в редакцию
02.12.2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ МЕМБРАНОЙ

Проведен анализ основной и дополнительной (температурной) погрешностей преобразователя давления с учетом деформации интегрального чувствительного элемента.

Интегральный полупроводниковый преобразователь давления принципиально отличается от интегральной микросхемной схемы обработки информации тем, что чувствительный элемент не может быть полностью изолирован от окружающей среды. Более того, чувствительный элемент должен механически взаимодействовать со средой наиболее рациональным образом, обеспечивая тем самым решение измерительной задачи.

В настоящее время задача измерения давления агрессивных сред является весьма актуальной. При этом защита интегрального чувствительного элемента (ЧЭ) решается двумя путями — нанесением защитных пассивирующих покрытий на ЧЭ и использованием разделяющих мембран (РМ) [1]. В последнем случае давление среды передается мембраной через гидравлическую (инертную) жидкость на интегральный ЧЭ. Такая конструкция позволяет измерять давление в жидких агрессивных или стерильных средах, а также в жидких средах с твердыми включениями. Вместе с тем наличие разделяющей мембраны и гидравлической жидкости может служить причиной как основной погрешности преобразователя давления, так и дополнительной, обусловленной изменением температуры.

В работе [1] проведен анализ температурной погрешности преобразователя давления с РМ без учета влияния деформации ЧЭ преобразователя на его погрешность.

В настоящей работе исследуется конструкция первичного преобразователя давления с РМ с целью

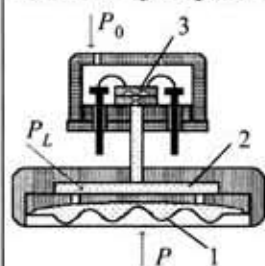


Рис. 1. Конструкция преобразователя давления:
1 — разделительная мембрана; 2 — гидравлическая жидкость; 3 — интегральный чувствительный элемент

Авторы благодарны С. Е. Литвину за помощь при выполнении работы.

минимизации как основной, так и дополнительной (температурной) погрешности с учетом деформации интегрального ЧЭ.

На рис. 1 схематически показана конструкция преобразователя относительного (относительно атмосферного) давления с РМ. Конструкция включает гофрированную РМ 1, гидравлическую жидкость 2, а также измерительный модуль 3, состоящий из кремниевых диафрагмы и основания. Более подробно конструкция и принцип работы измерительного модуля рассмотрены в работе [2].

Анализ конструкции преобразователя проведем при следующих предположениях: рабочая жидкость не содержит газов, заполнение гидравлической жидкостью произведено при температуре $T_0 = 300$ К и давлении $P_{L0} = 100$ кПа. В этих условиях деформации РМ и диафрагмы измерительного модуля в отсутствие внешнего механического воздействия равны нулю.

При подаче давления P на РМ (см. рис. 1) мембрана прогибается под разностью давлений $P - P_L$, где P_L — давление гидравлической жидкости. При этом изменение объема гидравлической жидкости ΔV_L можно записать в виде разности изменений объемов, обусловленных прогибами мембраны (ΔV_M) и кремниевой диафрагмы измерительного модуля (ΔV_S):

$$\Delta V_L = \Delta V_M - \Delta V_S \quad (1)$$

(Уравнение (1) отличается от аналогичного уравнения, приведенного в работе [1], наличием дополнительного слагаемого ΔV_S .)

Изменение объема гидравлической жидкости при сжатии давлением P_L определяется соотношением

$$\Delta V_L = k_L V_0 (P_L - P_{L0}), \quad (2)$$

где k_L — коэффициент объемной сжимаемости жидкости;

V_0 — объем гидравлической жидкости при $P_L = P_{L0}$ и $T = T_0$.

Величина ΔV_M связана с величинами радиуса r_M и толщины h_M РМ соотношением [1]

$$\Delta V_M = \frac{\pi r_M^2 x_M h_M \cdot 2(1 + \alpha)}{3(3 + \alpha)}, \quad (3)$$

где x_M — величина прогиба в центре мембраны, отнесенная к ее толщине;

α — параметр, величина которого зависит от формы и высоты гофра.

Далее будем рассматривать РМ с синусоидальной формой профиля гофрировки и глубиной гофрировки H . Другие формы профиля гофрировки РМ исследованы в работе [1].

В нашем случае $\alpha = \sqrt{1 + (3H^2/2h_m^2)}$, а величину x_m можно найти из уравнения характеристики мембраны

$$\frac{(P - P_L)r_m^4}{E_m h_m^4} = \frac{2(3 + \alpha)(1 + \alpha)}{2[1 - (v/\alpha)^2]} x_m^3 + \frac{32}{\alpha^2 - 9} \left[\frac{1}{6} - \frac{3 - v}{(\alpha - v)(\alpha + 3)} \right] x_m^3. \quad (4)$$

где E_m и v — соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала, из которого изготовлена мембрана [3, с. 276].

Определим изменение объема, обусловленное деформацией ЧЭ.

В нашем случае интегральный ЧЭ представляет собой кремниевую пластинку с жестким центром [2]. Для пластинки с жестким центром толщиной h_s , радиусами внешнего r_s и внутреннего r_{s0} контуров величина прогиба, отнесенная к толщине пластины, x_s в линейном приближении ($|x_s| \ll 1$) равна [3, с. 237]

$$x_s = \frac{3(1 - v_s^2)[c^4 - 1 - 4c^2 \ln(c)](P_L - P_0)r_s^4}{16c^4 E_{ys} h_s^4}, \quad (5)$$

где E_{ys} и v_s — модуль Юнга и коэффициент Пуассона кремния, соответственно;
 $c = r_s/r_m$;
 P_0 — давление, которое подводится к кремниевой диафрагме с внешней стороны (см. рис. 1).

Изменение объема ΔV_s , обусловленное прогибом пластинки с жестким центром [4, с. 48],

$$\Delta V_s = \pi r_{s0}^2 x_s h_s (c^2 + c + 1)/3. \quad (6)$$

Для преобразователя абсолютного, относительного и дифференциального давления величина P_0 в выражении (5) равна соответственно нулю, атмосферному давлению и некоторому давлению P_0 . Таким образом, измеряемая разность давлений равна $P - P_0$ и в общем случае может отличаться от разности давлений на внешней и внутренней сторонах кремниевой диафрагмы измерительного модуля ЧЭ $P_L - P_0$. Тогда выражение для относительной погрешности преобразователя давления можно записать в виде

$$\Delta = \left| \frac{(P - P_0) - (P_L - P_0)}{P - P_0} \right| \times 100\% = \left| \frac{P - P_L}{P - P_0} \right| \times 100\%. \quad (7)$$

Разделительная мембрана является источником основной и дополнительной, температурной погрешностей интегрального преобразователя давления.

Основную погрешность преобразователя в изотермических условиях определяет выражение (7). Ее величина пропорциональна отношению гибкости РМ и кремниевой диафрагмы. Как следует из выражений (4) и (5) (см. также [5]), гибкости РМ и кремниевой диафрагмы соответственно пропорциональны отношениям r_m^4/h_m^3 и r_s^4/h_s^3 . В связи с этим гибкость РМ должна быть существенно выше гибкости кремниевой диафрагмы. В нашем случае это достигается выбором величин $r_m \gg r_s$ и $h_m < h_s$.

Численную оценку основной погрешности преобразователя проведем при следующих значениях параметров:

— для разделительной мембраны из сплава 81НМА [6, с. 36] $E_{ym} = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $h_m = 20$ мкм, $r_m = 11$ мм, $v = 0,3$;

— для кремниевой пластины $E_{ys} = 1,7 \cdot 10^{11}$ Па, $v_s = 0,3$, $h_s = 35$ мкм, $r_s = 1,75$ мм, $c = 1,38$;
 — для кремнийорганической гидравлической жидкости: $V_0 = 0,2$ см³, $k_L = 6 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹ [1].

Как следует из выражения (7), для расчета основной погрешности необходимо определить величину давления в объеме гидравлической жидкости P_L . Значение P_L находим подстановкой выражений (2), (3) и (6) в выражение (1). При этом величину относительного прогиба РМ x_m можно найти из кубического уравнения (4), используя решение Кардано [4, с. 43].

На рис. 2 показана расчетная зависимость основной погрешности преобразователя давления с $P = 10$ кПа и $h_s = 20$ мкм от толщины РМ при различных значениях коэффициента гофрировки $k_m = H/h_m$. Здесь значение $k_m = 0$ соответствует плоской мембране.

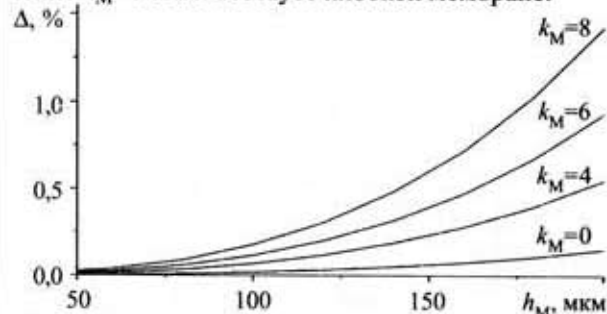


Рис. 2. Зависимость основной погрешности преобразователя от толщины разделительной мембраны при различных значениях коэффициента гофрировки k_m

Как видно из рис. 2, с ростом толщины РМ, а также величины параметра k_m , основная погрешность увеличивается. В этом случае измеряемая разность давлений $P - P_0$ распределяется между интегральным ЧЭ и разделительной мембраной пропорционально их величинам жесткости. При этом разность давлений на интегральном ЧЭ $P_L - P_0$ несколько ниже разности $P - P_0$, что обусловлено малой, но конечной жесткостью РМ.

Поскольку эта погрешность носит систематический характер, она может быть легко учтена при метрологической аттестации преобразователя. Несколько сложнее обстоит дело с температурной погрешностью.

При изменении температуры на величину $\Delta T = T - T_0$ выражение для ΔV_L принимает вид

$$\Delta V_L = V_0 [k_L (P_L - P_{L0}) - (\alpha_L - 3\alpha_H)(T - T_0)], \quad (8)$$

где α_L — коэффициент объемного расширения гидравлической жидкости;
 α_H — коэффициент линейного расширения материала корпуса преобразователя.

В расчетах принималось $\alpha_L = 7 \cdot 10^{-4}$ 1/К [1] и $\alpha_H = 1,7 \cdot 10^{-5}$ 1/К (для стали 12Х18Н10ТВ).

Далее, подставляя (8) в уравнение (1), можно найти зависимость $P_L(T)$ при различных значениях параметра k_m в отсутствие внешней нагрузки (рис. 3). В этом случае P_L можно рассматривать как "паразитное" давление, которое возникает вследствие температурного расширения гидравлической жидкости и приводит к появлению нулевого сигнала.

Как видно из рис. 3, в сравнительно узком диапазоне температур (280—320 К) погрешность, вносимая плоской мембраной ($k_m = 0$), меньше погрешно-

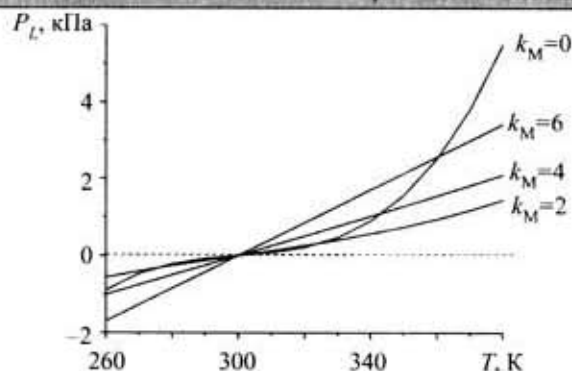


Рис. 3. Зависимость давления гидравлической жидкости от температуры при $P=P_0$ при различных значениях k_M

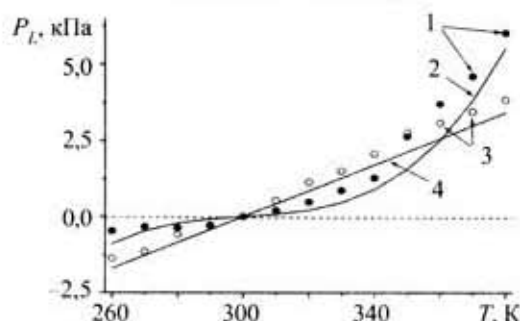


Рис. 4. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости давления гидравлической жидкости от температуры при $P=P_0$:
1, 2 — плоская мембрана; 3, 4 — гофрированная мембрана ($k_M=4$)

сти, вносимой гофрированной РМ, при равной толщине. Однако при $T > 330$ К погрешность, вносимая плоской РМ, резко возрастает. Это связано с тем, что при увеличении объема жидкости из-за изменения температуры прогиб РМ достигает величины, близкой к ее толщине, и жесткость РМ растет. Поскольку гофрированная РМ работает при значительно больших величинах прогиба, чем плоская, то ее жесткость с ростом величины прогиба при равных прочих условиях изменяется существенно меньше.

На рис. 4 приведены экспериментальные значения P_L в сравнении с расчетными зависимостями для плоской и гофрированной РМ в отсутствие нагрузки. Совпадение расчетных и экспериментальных значений можно считать удовлетворительным. Зависимость давления гидравлической жидкости от температуры приводит к температурному дрейфу нуля преобразователя давления. Для гофрированной РМ в широком диапазоне температур дрейф нуля пропорционален величине $T-T_0$. Для плоской РМ эта зависимость носит существенно нелинейный характер.

В рассмотренном интегральном преобразователе давления разделительная мембрана является источником основной и дополнительной (температурной) погрешностей.

Основная погрешность является систематической и может быть легко учтена в процессе метрологической аттестации преобразователя.

Температурная погрешность обусловлена дрейфом нулевого сигнала датчика с изменением температуры. За исключением узкого диапазона температур (280—320 К), преобразователь давления с гофрированной РМ при равных прочих условиях имеет более низкую температурную погрешность, чем с плоской РМ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Stankevic V., Simkevicius C. Thermal errors in media-separating housings of pressure sensors // *Sensors and Actuators*.— 1999.— Vol. 75.— P. 215—211.
2. Zhadko I. P., Babichev G. G., Kozlovskiy S. I. et al. Silicon pressure transducer with differential sensitive element based on transverse electromotive force effect // *Ibid.*— 2001.— Vol. 90.— P. 89—95.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. — М.: Машиностроительная литература, 1962.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1978.
5. Pat. 5999082 USA. Compensated oil-filled pressure transducers / A. D. Kurz, J. H. Hayer, R. Gardner et al.— 07.12.99.
6. Справочник по электротехническим материалам. Т. 3. / Под ред. Ю. В. Коричного, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

НОВЫЕ КНИГИ

Швец В. А. Одноплатные микроконтроллеры. Проектирование и применение. — М.: МК-Пресс, 2005, 304 с.

Книга посвящена вопросам комплексного проектирования одноплатных микроконтроллеров для информационных и управляющих систем, построенных на универсальных микропроцессорах x86 и микроконтроллерах семейства x51. Подробно рассматриваются вопросы проектирования узлов одноплатных микроконтроллеров, программного обеспечения, применение микропроцессоров в цифровой обработке информации и измерительных устройствах.

Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. — М.: Горячая линия-Телеком, 2005, 704 с.

В сжатой, приемлемой для инженерной и исследовательской практики форме обобщены и достаточно полно изложены методы анализа детерминированных сигналов (часть 1) и случайных сигналов и шумов (часть 2), используемые в теоретической радиотехнике. В каждом разделе теоретическая часть заканчивается расчетными выражениями и примерами расчета по ним.

Для инженеров и исследователей, работающих в области радиотехники, преподавателей, студентов старших курсов радиотехнических факультетов вузов, аспирантов.

