

06;12
©1994 г.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КОРПУСИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ И ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ИХ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Г.Г.Бабичев, И.П.Жадько, С.И.Козловский, А.Д.Кучерук, В.А.Романов

Институт полупроводников, 252650, Киев
(Поступило в Редакцию 14 июля 1993 г.)

Проведен анализ температурной зависимости тензочувствительности интегральных датчиков давления на основе кремния. Показано, что наряду с температурной зависимостью коэффициентов пьезосопротивления существенный вклад в температурную зависимость тензочувствительности могут вносить температурозависимые механические напряжения, обусловленные сборкой и корпусированием.

1. Как известно, характеристики и параметры интегральных тензопреобразователей определяются рядом факторов, связанных с особенностями конструкции, технологии изготовления и корпусирования тензомодулей. При этом в случае преобразователей давления обычно полагают, что особенности корпусирования сказываются, как правило, только на величине и температурной зависимости начального разбаланса v_0 — напряжения на выходе чувствительного элемента (ЧЭ) при нулевом давлении ($p = 0$) (см., например, [1]).

В настоящей работе на основе анализа результатов исследования большого количества датчиков давления с различными толщинами мембран убедительно показано, что в некоторых важных случаях условия корпусирования тензомодулей влияют не только на параметр $\Delta v_0(T)$, но также весьма существенно сказываются на величине и температурной зависимости тензочувствительности приборов.

2. Исследовались характеристики датчиков, основные элементы конструкции которых показаны на рис. 1 и 2. Тензомодули изготавливались методами интегральной технологии на стандартных пластинах n -кремния. Чувствительный элемент (рис. 1, а), работающий на основе эффекта поперечной тензоэдс [$^2-4$] (деформационный аналог датчика Холла) сформирован на поверхностном p -слое (имплантация бора с последующей разгонкой на глубину 1.5 мкм, поверхностное сопротивление $\rho_s = 300 \text{ Ом}/\square$). Элемент расположен в центре планарной стороны профилированной мембраны, содержащей два одинаковых

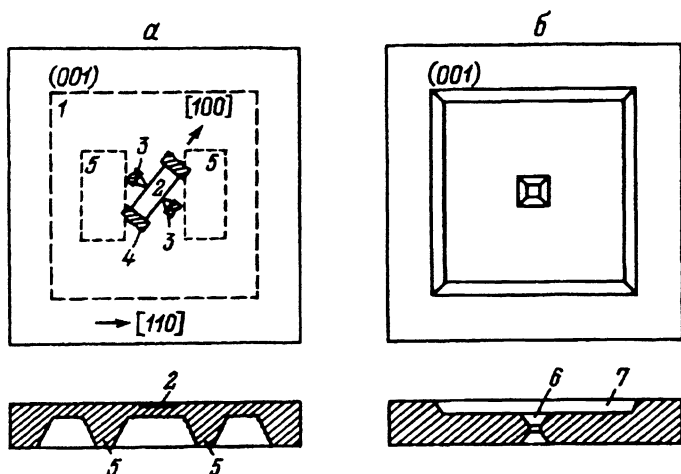


Рис. 1. Конструкция тензомодуля (а) и пластины-основания (б).

1 — мембрана; 2 — преобразующий элемент на основе поперечной тензоэды; 3, 4 — соответственно измерительные и токовые контакты преобразующего элемента; 5 — жесткие островки; 6 — сквозное отверстие; 7 — углубление.

жестких островка, расположенных симметрично относительно центра (рис. 1, а). Мембрана сформирована анизотропным травлением пластины n -Si в КОН. Такая конструкция модуля обеспечивает весьма эффективную трансформацию воздействующей на мембрану равномерно распределенной нагрузки P в достаточно однородное механическое $\langle 110 \rangle$ -напряжение в зоне расположения ЧЭ.

Важным звеном процесса корпусирования является операция соединения тензомодуля с кремниевой пластиной-основанием, в центре которой анизотропным травлением сформированы сквозное отверстие b и квадратное углубление 7, совпадающие по периметру с внешним контуром мембраны (рис. 1, б). Использовался электростатический способ соединения через микронный слой модифицированной двуокиси кремния, предварительно термически выращенной на соответствующей поверхности пластины-основания (см., например, [5]). Полученная таким образом структура тензомодуль-кремниевое основание позволяет значительно снизить уровень паразитных деформаций мембраны при окончательном монтаже прибора.

Подвод к мембране измеряемого давления P газа или жидкости осуществляется с помощью металлической трубки, присоединенной, как показано на рис. 2, к структуре с помощью двухкомпонентного полимеризующего (при $\sim 130^\circ \text{C}$) клея типа УПЛ-3. При этом использовались трубки двух типов: коваровые и нейзильберовые с наружным диаметром 3 мм и внутренним 2–2.5 мм. В дальнейшем трубка с присоединенной кремниевой структурой вставлялась в отверстие основания корпуса и приклеивалась к нему (рис. 2). Процесс сборки преобразователя практически заканчивался присоединением контактных площадок ЧЭ к выводам корпуса путем разварки алюминиевых проволочек. Свободная посадка защитной крышки корпуса обеспечивает атмосферное давление на планарную сторону мембраны, так что прибор в целом является датчиком избыточного давления.

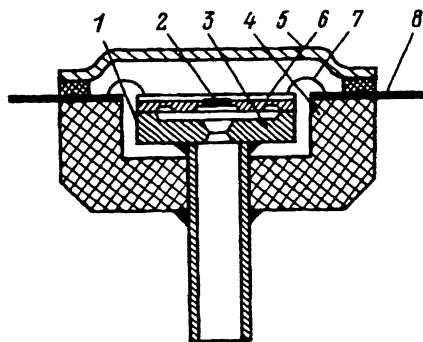


Рис. 2. Эскиз конструкции тензопреобразователя.

1 — тензомодуль, 2 — преобразующий элемент, 3 — пластина-основание, 4 — корпус, 5 — крышка корпуса, 6 — диэлектрический слой двуоксида кремния, 7 — алюминиевые проволочки, 8 — выводы корпуса.

3. Все измерения проводились в температурном диапазоне — 10–80° С. При этом основное внимание уделялось анализу основного параметра датчика — тензочувствительности S как функции температуры, толщины мембраны и условий корпусирования (присоединение коваровой или нейзильберовой трубки). При слабых деформациях мембраны, вызванных избыточным давлением P , тензочувствительность $S(T_0)$ при температуре T_0 определяется как отношение приращения выходного сигнала Δv к приращению приложенного давления ΔP , отнесенное к напряжению питания элемента U [1],

$$S(T_0) = \frac{\Delta v}{\Delta P} \frac{1}{U} \Big|_{P \rightarrow 0} \quad (1)$$

С другой стороны, температурную зависимость $S(T)$ в узком температурном интервале всегда можно представить в виде

$$\frac{S(T)}{S(T_1)} = \left(\frac{T}{T_1} \right)^\beta \Big|_{T \rightarrow T_1}, \quad (2)$$

где $S(T_1)$ — тензочувствительность при $T_1 < T$.

Для любого температурного диапазона ($T_1 - T_2$, $T_1 < T_2$) можно ввести среднее значение параметра $\bar{\beta}$, определяемого, по аналогии с [2], формулой

$$\bar{\beta} = \lg \left[\frac{S(T_2)}{S(T_1)} \right] / \lg \left(\frac{T_2}{T_1} \right). \quad (3)$$

Экспериментально изучался именно параметр $\bar{\beta}$, определяемый в температурном диапазоне — 10–80° С.

Ясно, что в отсутствие каких-либо неконтролируемых (паразитных) деформаций чувствительность S_0 при прочих равных условиях определяется только толщиной мембраны d ($S_0 \sim d^{-2}$ [6]), а параметр $\bar{\beta}$ на зависит от d . Наоборот, всякая зависимость от d (или S_0) свидетельствует прежде всего о наличии температурозависимых паразитных деформаций, изменяющих жесткость мембраны, а следовательно, и величину S_0 . С учетом этих соображений проводились как сами опыты, так и интерпретация полученных результатов.

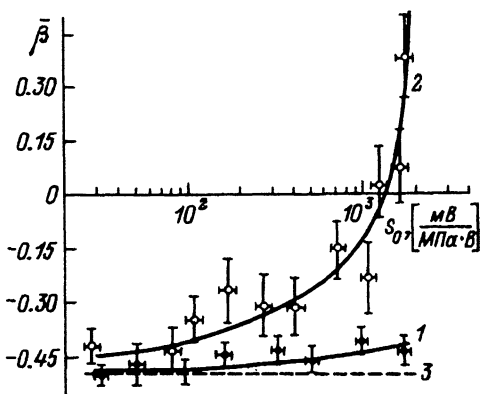


Рис. 3. Зависимость параметра $\bar{\beta}$ от чувствительности преобразователя при различных условиях сборки тензомодуля.

1, 2 — посадка на нейзильберовую и коваровые трубочки соответственно; 3 — посадка, не создающая "паразитные деформации".

На рис. 3 представлены зависимости параметра $\bar{\beta}$ от чувствительности S_0 при $T_0 = 21^\circ\text{C}$ для преобразователей с коваровыми (кривая 1) и нейзильберовыми (кривая 2) трубками ввода избыточного давления. Здесь каждая из нанесенных точек представляет собой результат усреднения данных, полученных на 8–12 однотипных датчиках с близкими по толщине мембранами, а исследованному интервалу значений S_0 отвечает диапазон изменения толщин мембран 120–20 мкм.

Видно, что указанные зависимости сильно отличаются для датчиков 1-го и 2-го типов (с коваровыми и нейзильберовыми трубками соответственно). Если для датчиков 1-го типа (кривая 1) незначительное падение $|\bar{\beta}|$ с ростом S_0 (уменьшением d) наблюдается во всем исследованном диапазоне $S_0(d)$, то подобная зависимость $\bar{\beta}(S_0)$ для датчиков 2-го типа имеет место лишь в случае толстых мембран ($d \gtrsim 80$ мкм), а в области промежуточных и особенно малых d (больших S_0) абсолютное значение параметра $\bar{\beta}$ сильно уменьшается, достигает нуля и в дальнейшем его знак изменяется (кривая 2).

Характер полученных зависимостей $\bar{\beta}$ от S_0 безусловно связан с паразитными деформациями мембран, возникающими в процессе присоединения трубок к основаниям тензомодулей. Действительно, присоединение, как уже отмечалось, осуществлено с помощью достаточно "жесткого" клея типа УПЛ-3 при 130°C . С другой стороны, коэффициенты температурного расширения (КТР) в исследуемой области температур для кремния, ковара и нейзильбера примерно равны $3 \cdot 10^{-6}$, $6.5 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$ соответственно [7,8]. Поэтому данная технология корпусирования неизбежно должна приводить к исходным деформациям растяжения мембран, возрастающим с понижением рабочей температуры датчиков. Ясно, что из-за очень сильного различия КТР кремния и нейзильбера указанные деформации будут особенно существенными в датчиках 2-го типа.

Согласно расчетам (см. "Приложение"), влияние внутренних механических напряжений на тензочувствительность S_0 сильно возрастает с уменьшением толщины мембраны. В частности, при напряжениях растяжения жесткость мембраны увеличивается и чувствительность датчика, при прочих равных условиях уменьшается.

В соответствии с вышеизложенным становятся понятными особенности полученных зависимостей $\bar{\beta}$ от S_0 и условий корпусирования

преобразователей. Так, в случае толстых мембран (чему на рис. 3 соответствует область $S_0 < 80$ мВ/МПа·В) внутренние напряжения слабо влияют на тензочувствительность (см. "Приложение"), и поэтому здесь значения $\bar{\beta}$ для датчиков обеих групп близки между собой и практически не зависят от S_0 (толщины мембраны). В преобразователях 1-й группы из-за близости значений КТР кремния и ковара внутренние напряжения сами по себе незначительны, так что их влияние слабо сказывается на величине $\bar{\beta}$ во всем исследованном диапазоне толщин мембраны (сравните зависимости 1 и 3 на рис. 3). В датчиках 2-й группы влияние внутренних напряжений существенно сказывается уже при умеренных толщинах мембран, резко возрастая с их утоньшением. Исходя из выражений (1)–(3) и результатов приведенного в "Приложении" расчета, а также принимая во внимание, что внутренние деформации растяжения мембраны уменьшаются с ростом температуры, нетрудно получить зависимости, совпадающие (по крайней мере качественно) с экспериментальными кривыми 1 и 2 на рис. 3.

В заключение выражаем признательность В.А. Зайцеву за помощь в проведении экспериментов.

Приложение

Рассмотрим влияние внутренних однородных напряжений сжатия (растяжения) τ в круговой пластине радиуса a , защемленной по контуру, на величину механических напряжений σ , обусловленных равномерно распределенной по ее поверхности нагрузкой P .

При малых деформациях изгиба величины радиальной σ_r и тангенциальной σ_t составляющих механического напряжения, обусловленные нагружением пластины, связаны с величиной прогиба W соотношениями [6,9].

$$\sigma_r = -\frac{Ed}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right), \quad (1\Pi)$$

$$\sigma_t = -\frac{Ed}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} \right), \quad (2\Pi)$$

где

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} = \begin{cases} -\frac{Pa^2}{2k^2D} \left[1 + \frac{aI_1\left(\frac{kr}{a}\right) - krI_0\left(\frac{kr}{a}\right)}{rI_1(k)} \right], \\ \frac{Pa^2}{2k^2D} \left[1 + \frac{aJ_1\left(\frac{kr}{a}\right) - krJ_0\left(\frac{kr}{a}\right)}{rJ_1(k)} \right], \end{cases} \quad (3\Pi, 4\Pi)$$

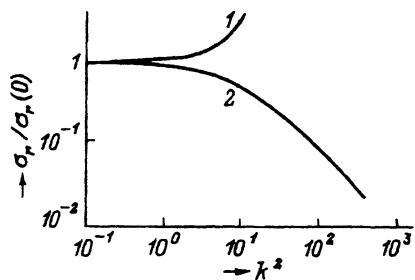


Рис. 4. Зависимость механических напряжений, обусловленных нагружением пластины, от величины внутренних деформирующих усилий.

1 — сжатие, 2 — растяжение.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = \begin{cases} -\frac{Pa^2}{2k^2 D} \left[1 - \frac{aJ_1\left(\frac{kr}{a}\right)}{rJ_1(k)} \right], \\ \frac{Pa^2}{2k^2 D} \left[\frac{aJ_1\left(\frac{kr}{a}\right)}{rJ_1(k)} \right]. \end{cases} \quad (5\Pi, 6\Pi)$$

Здесь E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; d — толщина пластины; r — текущий радиус; $J_{0,1}(k)$, $I_{0,1}(k)$ — функции Бесселя первого рода; $D = Ed^3/12(1 - \nu^2)$. Величина k связана с величиной внутренних напряжений в пластине соотношением $k^2 = ad|\tau|/D$. Выражения (3П), (5П) относятся к случаю внутренних напряжений растяжения, а (4П), (6П) — сжатия.

Проанализируем зависимость $\sigma_r(r)$ (ради простоты) в центре пластины ($r = c$). Тогда из формул (1П), (3П)–(6П) получаем

$$\sigma_r = \frac{8\sigma_r(0)}{k^2} \begin{cases} \left[1 - \frac{k}{2I_1(k)} \right], \\ \left[\frac{k}{2J_1(k)} - 1 \right]. \end{cases} \quad (7\Pi, 8\Pi)$$

В этом случае $\sigma_r(0) = 3Pa^2(1 + \nu)/8d^2$ — величина механического напряжения σ_r при $\tau = 0$, выражение (7П) относится к внутренним растягивающим усилиям, а (8П) — к сжимающим.

На рис. 4 показана зависимость $\sigma_r(k^2)$. Из рисунка видно, что по мере увеличения внутреннего напряжения величина механического напряжения, обусловленная нагружением пластины, при прочих равных условиях увеличивается для сжимающих внутренних напряжений и уменьшается для растягивающих. Причем поскольку $k^2 \sim |\tau|/d^2$, то влияние τ на величину σ будет сильнее в пластинах с малой толщиной. Такая тенденция отчетливо наблюдается в эксперименте (рис. 3).

Список литературы

- [1] Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. М., 1979. 136 с.
- [2] Шмарцев Ю.В., Мирзабаев М. // ФТП. 1971. Т. 5. Вып. 11. С. 2245–2246.
- [3] Жадько И.П., Романов В.А., Сердега Б.К. // ПТЭ. 1972. № 5. С. 215–216.
- [4] Гридчин В.А., Пирогова Р.А. // Измерит. техника. 1985. № 1. С. 40–42.
- [5] Queñzer H.J., Benecke W. // Sensors and Actuators. A. 1992. Vol. 32. N 1–3. P. 340–344.
- [6] Chau H.L., Wise K.D. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1987. Vol. ED-34. N 4. P. 850–858.
- [7] Кэй ДЖ., Лэби Т.Л. Таблицы физических и химических постоянных. М., 1962. С. 247.
- [8] Горелик С.С., Литвинов Ю.Н., Постолов В.Г., Пригодько А.В. // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектрон. 1985. № 4 (116). С. 82–86.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М., 1965. С. 203.