

МИНИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ МИКРОДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ПРИ КОРПУСИРОВАНИИ

Е. И. ВОЛКОВА, С. А. ПОПКОВ

*Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова,
603137, Нижний Новгород, Россия
E-mail: niis@niis.nnov.ru*

Представлены результаты исследований механических напряжений, возникающих в чувствительном элементе (ЧЭ) микродатчика давления при его монтаже в корпус. Методом конечных элементов выполнено численное моделирование как остаточных механических напряжений самого кристалла ЧЭ, так и напряжений, вызванных термическим расширением-сжатием при размещении кристалла ЧЭ в системе „опорный кристалл—корпус“. Определена оптимальная конструкция опорного кристалла, в которую входят как планарные, так и объемные термокомпенсационные элементы, позволяющие минимизировать вызванные температурными колебаниями напряжения. Из представленных типов опорных кристаллов выбраны те, которые не приносят дополнительный отрицательный функционал в выходную характеристику при работе ЧЭ. Предложена собственная модель опорного кристалла, применимая для ЧЭ датчика как абсолютного, так и дифференциального давления.

Ключевые слова: опорный кристалл, механические напряжения, чувствительный элемент, микродатчик давления, микросистемная техника

В условиях быстрого развития измерительной техники остается нерешенной проблема чувствительного элемента или первичного преобразователя [1]. За последние десятилетия сформировалось несколько фундаментальных направлений развития микросистемной техники (МСТ), к одному из них относится разработка интегральных преобразователей давления, принцип работы которых в ряде случаев базируется на тензорезистивном эффекте. Такой механизм преобразования энергии широко используется благодаря относительно высокой точности измеряемых выходных характеристик ЧЭ [2] и простоте конструкции элемента, в которой используются тензорезисторы. При этом существуют интегральные преобразователи давления, функционирующие, например, на емкостных или оптических эффектах [3].

Процесс разработки интегрального преобразователя давления или ЧЭ МДД, в большинстве случаев представляющего собой мембрану [1], включает создание поддерживающего (опорного) кристалла, который необходим, чтобы обеспечить механическую развязку между самим ЧЭ и корпусом прибора. Одной из функций подобного буферного слоя является минимизация механических напряжений, возникающих, например, вследствие термического линейного расширения основания корпуса прибора, на котором установлен ЧЭ.

В настоящей работе решается задача поиска оптимальной конструкции опорного кристалла, позволяющей сократить объем паразитных внешних воздействий на ЧЭ МДД и тем самым уменьшить нежелательные составляющие в выходной характеристике.

Использование механической развязки ЧЭ с корпусом в виде промежуточного кристалла — это наиболее распространенный способ компенсации внутренних механических напряжений, возникающих в мембране ЧЭ из-за нарушения ее геометрической формы под влиянием температуры ввиду анизотропности коэффициентов температурного расширения. Установка мембраны на массивный опорный кристалл, высота которого в несколько раз превышает

толщину кристалла ЧЭ (модель I, показана на рис. 1) [4], позволяет в первом приближении минимизировать, а в некоторых случаях — полностью снять механические напряжения.

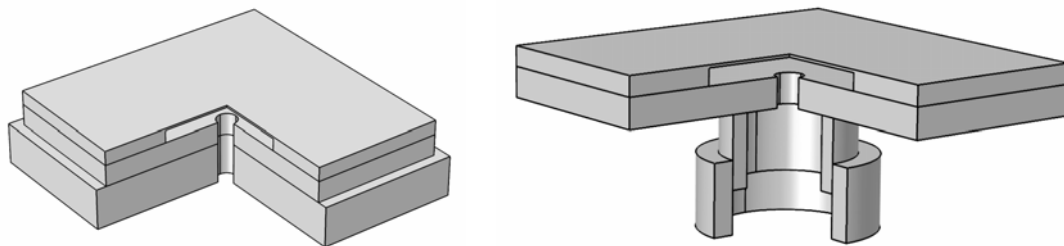


Рис. 1

Наряду с различными способами изготовления опорного кристалла существует технология его получения при помощи электростимулированного (анодного) соединения нескольких пластин кремния или боросиликатных стекол, объединенных с кристаллом ЧЭ [5]. Однако для модели I использование такого подхода не всегда эффективно из-за увеличения числа операций и оборудования по сравнению с циклом обработки стандартной кремниевой пластины. К тому же рассогласование в тепловых коэффициентах расширения (ТКР) при анодном соединении двух кристаллов вызывает преднапряженное состояние в мембране ЧЭ, что негативно сказывается на характеристиках тензорезисторов и приводит к начальной разбалансировке моста в электрической схеме, в которую включается ЧЭ.

Альтернативный способ преодоления этой проблемы — использование опорных кристаллов, в конструкции которых предусмотрены как планарные, так и объемные термокомпенсационные элементы [6, 7]. Среди имеющихся разновидностей конструкций опорных кристаллов были выбраны те, с помощью которых возможно минимизировать механические напряжения, и конструкция которых не приносит дополнительный отрицательный функционал (например, дополнительный вклад в выходную зависимость ЧЭ от действующего на него ускорения). На рис. 2 представлены три типа опорных кристаллов, имеющих в своей конструкции термокомпенсаторы упругих напряжений: *а* — кристалл имеет форму гофрированной поверхности (модель II); *б* — кристалл и мембрана ЧЭ крепятся через подвес (модель III); *в* — опорный кристалл ЧЭ имеет планарные термокомпенсаторы, закрепление осуществляется через керамическую трубку (модель IV).

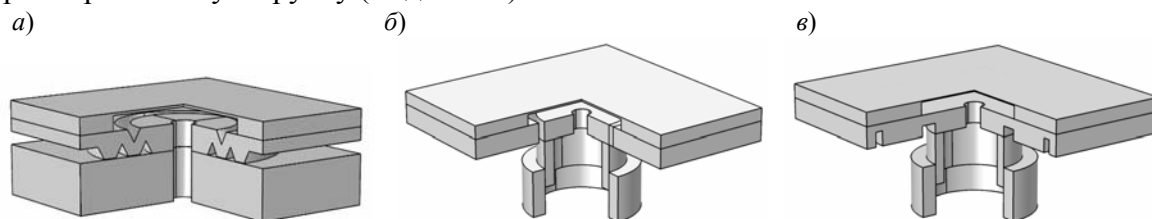


Рис. 2

Можно выделить два класса поддерживающих кристаллов, в конструкцию которых входят термокомпенсаторы упругих напряжений: кристаллы, способные компенсировать механические напряжения, действующие вдоль плоскости XU (декартовой системы координат), см. рис. 2, *б*; кристаллы, минимизирующие напряжения в плоскости XU с возможным использованием направления вдоль оси Z , см. рис. 2, *а*, *в*.

Габаритные размеры и материалы созданных моделей рассмотренных вариантов конструкций ЧЭ были взяты из описания действующих приборов [4]. Расчет механических напряжений, возникающих в мембране ЧЭ, осуществлялся в среде Comsol Multiphysics методом конечных элементов. Чтобы учесть ряд особенностей физической модели, в итоговую конструкцию вошли следующие рабочие слои: кристалл с мембраной МДД, опорный кристалл и основание корпуса. Для изготовления ЧЭ и моделей II, III и IV опорного кристалла с термокомпенсаторами был использован объемный кремний. Мембрана ЧЭ модели I располагалась

на боросиликатном стекле. Основание корпуса у всех рассматриваемых моделей выполнено из ковара. Модели III и IV (см. рис. 2, б, в) крепятся в корпусе при помощи керамической и медной (сваренной в корпус) трубочек.

Оптимальная конструкция опорного кристалла определялась путем моделирования. На рис. 3 представлено распределение механических напряжений в ЧЭ МДД для модели I. Если ЧЭ расположен на опорном кристалле из боросиликатного стекла, при изменении температуры наблюдаются механические деформации мембраны. В результате деформаций в мембране возникает прогиб, направленный против действия потока газа. Итогом такого совместного воздействия противоположно направленных механических напряжений станет падение уровня выходного сигнала, и у внешнего наблюдателя может возникнуть неверное предположение, что измеряемое давление потока газа снизилось. Подобная ситуация повторяется и в области отрицательной температуры.

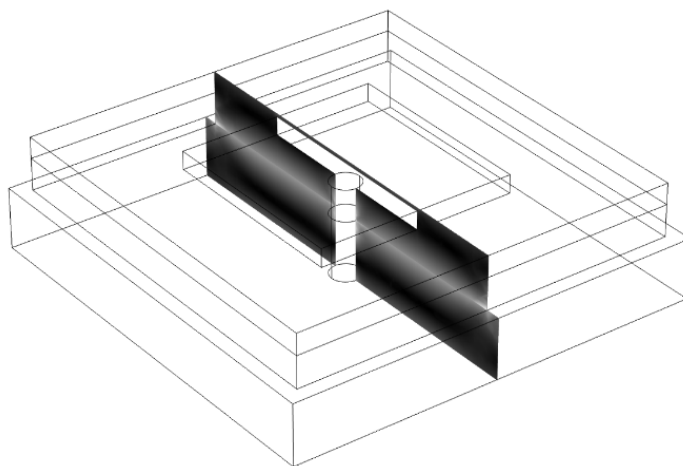


Рис. 3

В отличие от изготовленного из стекла опорного кристалла, у которого площадь соприкосновения кристалла мембраны максимальна, в модели II область контакта занимает не более 30 % от нижней грани основания, а у моделей III и IV первоначальное взаимодействие осуществляется через керамическую трубочку, которая далее закрепляется в медной трубке, жестко сваренной с корпусом. При этом область контакта с керамической трубочкой для моделей III и IV также не превышает 30 % от площади. Таким образом, уменьшение области контакта опорного кристалла с корпусом сокращает область распространения деформаций. На рис. 4 продемонстрировано распределение механических напряжений в ЧЭ МДД для модели II (а), III (б) и IV (в).

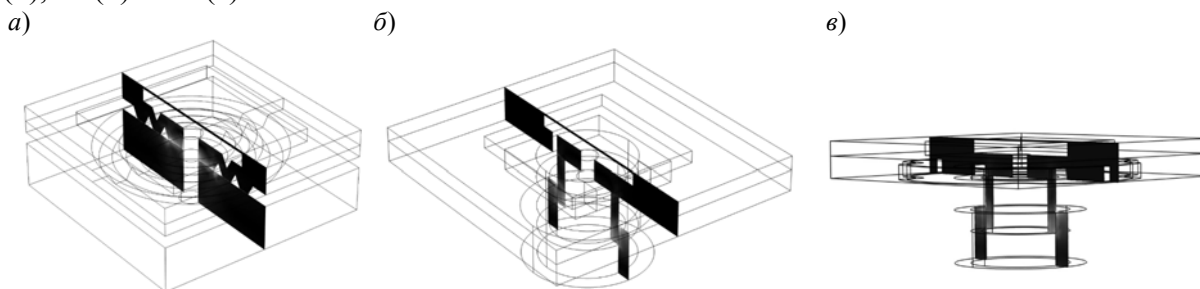


Рис. 4

Опорный кристалл в виде гофрированной поверхности обладает радиальной симметрией, и с увеличением расстояния от центра кристалла механические напряжения практически полностью релаксируют. По сравнению с исследованными аналогами преимущество подобной конструкции заключается в том, что такой тип опорного кристалла наименее подвержен действию механических напряжений, связанных с температурными перепадами, поскольку

вся гофрированная поверхность выступает в роли термокомпенсатора. Помимо этого конструкция моделей II и IV не требует дополнительной герметизации, и такой вариант ЧЭ подходит для датчика как абсолютного, так и дифференциального давления. При этом недостатками являются сложность получения заданных кристаллографических плоскостей с помощью жидкостного травления с обеих сторон опорного кристалла гофрированной формы, хрупкость при монтаже [4] и в областях высокой дефектности.

Опорный кристалл модели III связан с корпусом закрепленным подвесом и трубочкой, поэтому деформации, вызванные аналогичными температурными колебаниями, не влияют на работу ЧЭ. Все температурные изменения, связанные с внешней средой, на первом этапе поглощаются керамической трубочкой, а уже затем подвесом, на конце которого имеется основание для закрепления на трубочке. Преимущество такой конструкции заключается в простоте изготовления опорного кристалла, главные элементы которого — основание крепления керамической трубочки и плоский подвес, объединяющий основание с остальной частью кристалла. Радиальная симметрия основания и особенности области крепления посадочного места, где оно располагается, позволяют выполнить механическую развязку с корпусом при минимальном взаимодействии через подвес. Однако при такой конструкции для ЧЭ датчика абсолютного давления необходимо изготовить дополнительную защитную крышку с целью герметизации мембраны ЧЭ. Кроме того, система, обладающая подвесом даже большой жесткости, как в данном варианте, может выступать в качестве концентратора механических колебаний, что является отрицательным свойством конструкции.

Модель IV опорного кристалла достаточно проста в изготовлении, поскольку модификация рельефа поверхности пластины потребуется только с одной стороны. Подобное техническое решение имеет ряд преимуществ при изготовлении, поскольку минимизируются возможные технологические уходы и неточности. Термокомпенсаторы представляют собой набор из концентрических колец сложной формы, эта конструкция не является сквозной, поэтому, как было указано выше, для данной модели не потребуется дополнительная герметизация.

В работе проанализированы различные типы конструкции опорного кристалла ЧЭ МДД с целью выявления варианта механической развязки ЧЭ с корпусом прибора, соответствующего сразу нескольким критериям. Основным требованием было создание минимальных механических напряжений при температурных изменениях между мембраной МДД и поддерживающим кристаллом. Рассматривались: установка ЧЭ на опорном кристалле из боросиликатного стекла; объединение ЧЭ с опорным кристаллом гофрированной формы; расположение мембраны ЧЭ на опорном кристалле, имеющем в своей конструкции систему из подвеса и удерживающего основания; предложенная авторами конструкция — модель IV.

Анализ методом конечных элементов при температурном расширении-сжатии основания корпуса прибора показал, что для массивного опорного кристалла из стекла (модель I) необходимо выбирать материал, у которого ТКР схож с ТКР материалов системы „мембрана—опорный кристалл—корпус“, что подтверждает работа [4]. Модель II характеризуется наименьшим механическим напряжением, передаваемым от основания корпуса к мембране ЧЭ. Минимальное значение передаваемых механических напряжений может быть достигнуто через утонение стенки гофрированной поверхности опорного кристалла, что подробно изучалось в [7]. Благодаря технологическим возможностям и простоте конструкции целесообразно развивать модели III и IV опорных кристаллов, содержащих планарные термокомпенсационные элементы, поскольку этот вариант наиболее прост в производстве и наделен наилучшими прочностными характеристиками. Возможность применения модели IV опорного кристалла для ЧЭ датчика как абсолютного, так и дифференциального давления делает ее наиболее удачным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
2. Hsieh C.-C., Hung C.-C., Li Y.-H. Investigation of a pressure sensor with temperature compensation using two concentric wheatstone-bridge circuits // Modern mechanical engineering. 2013. Vol. 3. P. 104—113.
3. Cho S. T., Najafi K., Wise K. D. Secondary sensitivities and stability of ultrasensitive silicon pressure sensors // IEEE Solid-state sensor and actuator workshop. 1990. P. 184—187.
4. Beeby S., Ensel G., Kraft M., White N. MEMS mechanical sensors. London: Artech house MEMS library, 2004. 281 p.
5. Mirza A., Ayon A. Silicon wafer bonding: key to MEMS high-volume manufacturing // Sensors. 1998. P. 24—33. [Электронный ресурс]: <<http://archives.sensorsmag.com/articles/1298/sil1298/>>.
6. Offereins H. L., Sandmier H. Novel stress free assembly technique for micromechanical devices // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Micro, Electro, Opto, Mechanic Systems and Components „Micro-System Technologies '90“. Berlin: Springer, 1990. P. 515—520.
7. Spiering V. L. et al. On-Chip decoupling zone for package-stress reduction // IEEE. 1991. P. 982—985.

Сведения об авторах

- Екатерина Ивановна Волкова** — Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, научно-исследовательский отдел разработки аналоговых и аналого-цифровых интегральных схем; инженер-исследователь; E-mail: kattykat@inbox.ru
- Сергей Алексеевич Попков** — канд. физ.-мат. наук; Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, научно-исследовательский отдел разработки аналоговых и аналого-цифровых интегральных схем; старший научный сотрудник; E-mail: popkov-fzf@yandex.ru

Поступила в редакцию
28.12.17 г.

Ссылка для цитирования: Волкова Е. И., Попков С. А. Минимизация механических напряжений в чувствительном элементе микродатчика давления при корпусировании // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 4. С. 368—373.

**MINIMIZATION OF MECHANICAL STRESSES IN SENSITIVE ELEMENT
OF MICRO-PRESSURE SENSOR UNDER PACKAGING**

E. I. Volkova, S. A. Popkov

*Yu. Ye. Sedakov Research Institute of Measuring Systems,
603137, Nizhniy Novgorod, Russia
E-mail: niiis@niiis.nnov.ru*

Results of studies of mechanical stresses that occur in the sensitive element of micro-pressure sensor when it is mounted in the package are presented. The finite element method is used to numerically simulate both the residual mechanical stresses of the sensitive element crystal and the stresses caused by thermal expansion-compression, when the sensitive element crystal is placed in the system which binds support crystal and package. The optimal design of support crystal, which includes both two-dimensional and three-dimensional temperature compensator elements, is found to allow for minimizing stresses caused by temperature fluctuations. Among the considered types of support crystals, the ones that do not add additional negative functional in the output characteristic during sensitive element operation are selected, and a design that is easy to manufacture is chosen. An appropriate model of support crystal that is applicable for sensitive element sensor of both the absolute and differential pressure is proposed.

Keywords: support chip, mechanical stresses, sensitive element, pressure microsensor, microsystem technology

Data on authors

- Ekaterina I. Volkova** — Yu. Ye. Sedakov Research Institute of Measuring Systems, Department of Research and Development of Analog and Digital-Analog Integrated Circuits; Research Engineer; E-mail: kattykat@inbox.ru

Sergey A. Popkov — PhD; Yu. Ye. Sedakov Research Institute of Measuring Systems, Department of Research and Development of Analog and Digital-Analog Integrated Circuits; Senior Scientist; E-mail: popkov-fzf@yandex.ru

For citation: Volkova E. I., Popkov S. A. Minimization of mechanical stresses in sensitive element of micro-pressure sensor under packaging. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 4. P. 368—373 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-4-368-373