

УДК 621.3.084.2/621.3.032.5

DOI 10.53403/9785951505163\_2021\_26\_1\_260

# Способ минимизации механических напряжений в чувствительном элементе микромеханических устройств при монтаже в корпус

*Рассматриваются результаты исследований механических напряжений, возникающих в чувствительном элементе (ЧЭ) при его монтаже в корпус, и влияние механических напряжений на выходные характеристики на примере микродатчика давления (МДД). Приводятся данные численного моделирования деформаций кристалла ЧЭ, вызванных термическим расширением–сжатием при монтаже кристалла ЧЭ в системе опорный кристалл–корпус. Осуществляется поиск конструкции опорного кристалла, который при температурных изменениях позволяет минимизировать механические напряжения, обеспечивая механическую развязку между самим ЧЭ и корпусом прибора.*

Е. И. Волкова\*, П. А. Манин\*, С. А. Попков\*

## Введение

На протяжении многих лет особое внимание уделяется операции по корпусированию ЧЭ микроэлектромеханических систем ввиду важной роли, которую она играет в конечных параметрах готового прибора [1]. Среди многих предложенных концепций по развязке первичного преобразователя или ЧЭ наиболее устойчивые решения получило направление, согласно которому упаковка ЧЭ может быть выполнена гораздо эффективнее, если требуемые параметры по механической развязке уже заложены в кремниевом промежуточном слое или опорном кристалле. Одной из таких функций опорного кристалла является минимизация механических напряжений, возникающих, например, как следствие термического линейного расширения основания корпуса прибора, на котором установлен ЧЭ.

\* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.  
© Наноиндустрия. 2018. № 9. С. 544–551.

На сегодняшний день существует несколько фундаментальных направлений в области микросистемной техники, наиболее чувствительных к проблемам корпусирования. Одно из таких направлений включает в себя интегральные преобразователи давления, принцип работы которых в ряде случаев базируется на тензорезистивном эффекте. Использование данного эффекта как основного принципа работы преобразователя получило широкое распространение благодаря относительно высокой точности измеряемых характеристик ЧЭ [2] и простоте конструкции, в которой используются тензорезисторы. Однако, ряд факторов может ухудшать выходные характеристики. Наиболее остро обстоят дела с механическими напряжениями, которые приносят свой вклад в зависимость выходного сигнала от прикладываемого внешнего давления среды. Вклад от механических напряжений может приводить к смещению и дрейфу нуля зависимости, появлению гистерезиса в рабочем цикле, изменению времени отклика при резком изменении температуры. Таким образом, для разработки МДД, обладающего высокой точностью, требуется, чтобы все составляющие элементы проектируемого ЧЭ МДД были согласованы между собой с минимальным количеством механических напряжений на переходных интерфейсах в системе мембрана ЧЭ–корпус прибора или действие отрицательных факторов можно было бы компенсировать.

В данной работе рассматривается задача по поиску оптимальной конструкции опорного кристалла. Проводится сравнительный анализ среди приведенных вариантов по развязке с корпусом прибора, и предлагается вариант конструкции опорного кристалла, который позволяет сократить передачу паразитных воздействий на ЧЭ МДД и, тем самым, уменьшить нежелательные составляющие в выходной характеристике.

## *Теоретическая часть*

Несомненно, что в борьбе за максимально достижимый результат проявляются как положительные, так и отрицательные стороны в разработке конечного продукта. Если принять за основной параметр точность ЧЭ, то вторым по важности критерием является простота в технологии его изготовления. Поэтому дальнейшее рассмотрение и выбор опорных кристаллов как части ЧЭ среди наиболее распространенных видов велось на основе этих двух критериев. Конструкция поддерживающего кристалла должна обеспечивать минимальный вклад от нежелательных составляющих в выходной сигнал, и сам опорный кристалл можно изготовить в едином цикле на базе технологической линии микроэлектронных устройств.

Наибольшую популярность среди сравнительно недорогих ЧЭ МДД получила механическая развязка с корпусом в виде массивного опорного кристалла, высота которого в несколько раз превышает толщину кристалла ЧЭ (модель I на рис. 1, а) [3] или такого же основания, но уже закрепленного на керамической трубочке (модель II на рис. 1, б). Установка мембраны ЧЭ подобным образом в первом приближении позволяет частично снять механические напряжения, связанные с корпусированием ЧЭ.

Монтаж мембраны ЧЭ на опорный кристалл (модели I и II) осуществляется путем склеивания, пайки и легирования (см. работу [1]). Наряду с различными способами наиболее часто опорный кристалл типа модели I получают при помощи электростимулированного (анодного) соединения нескольких пластин кремния или боросиликатных стекол, которые, в свою очередь, объединяют с кристаллом ЧЭ [4]. Однако, механическая развязка такого вида в технологическом ключе не всегда является эффективной и оправданной из-за возрастающего количества операций и используемого оборудования по сравнению с циклом обработки стандартной кремниевой пластины. К тому же существенным недостатком этой концепции является требование, что все вхо-

дующие в ЧЭ и опорный кристалл слои должны иметь согласование между тепловыми коэффициентами расширения материала. При этом операция анодного соединения двух кристаллов приводит к преднапряженному состоянию в мембране ЧЭ, что негативно сказывается на характеристиках тензорезисторов и приводит к начальной разбалансировке моста в электрической схеме, в которую включается ЧЭ. Указанное обстоятельство будет продемонстрировано далее на примере зависимости выходного сигнала ЧЭ МДД от приложенного внешнего давления (рис. 8).

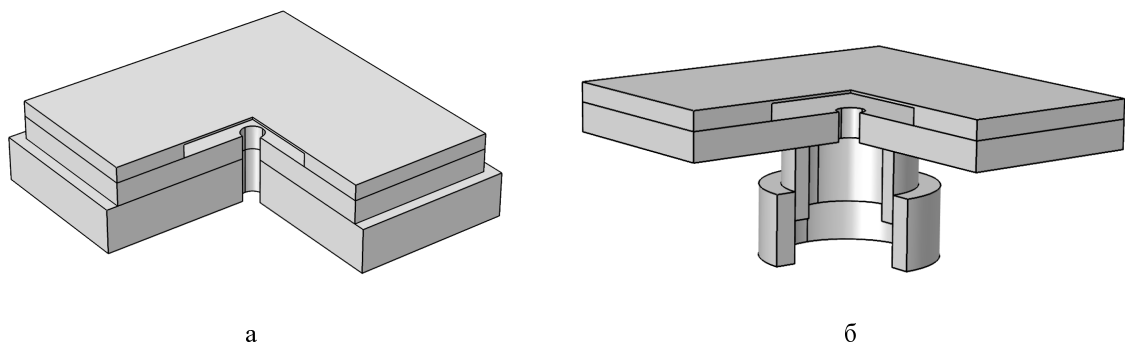


Рис. 1. ЧЭ МДД: а – расположение мембраны ЧЭ на массивном, опорном кристалле (модель I); б – расположение опорного кристалла на керамической трубке (модель II)

Альтернативным подходом к разработке формы опорного кристалла стало использование в его конструкции заранее предусмотренных планарных и объемных термокомпенсационных элементов [5, 6]. Среди имеющихся разновидностей конструкций опорных кристаллов были представлены те, с помощью которых возможно минимизировать механические напряжения и конструкция которых не привносит дополнительный отрицательный функционал, например, появление зависимости ЧЭ от действующего на него ускорения. На рис. 2 представлены два типа опорных кристаллов (модели III и IV), имеющие в своей геометрии термокомпенсаторы упругих напряжений, а на рис. 3 – модель V, предложенная в рамках исследований данной работы.

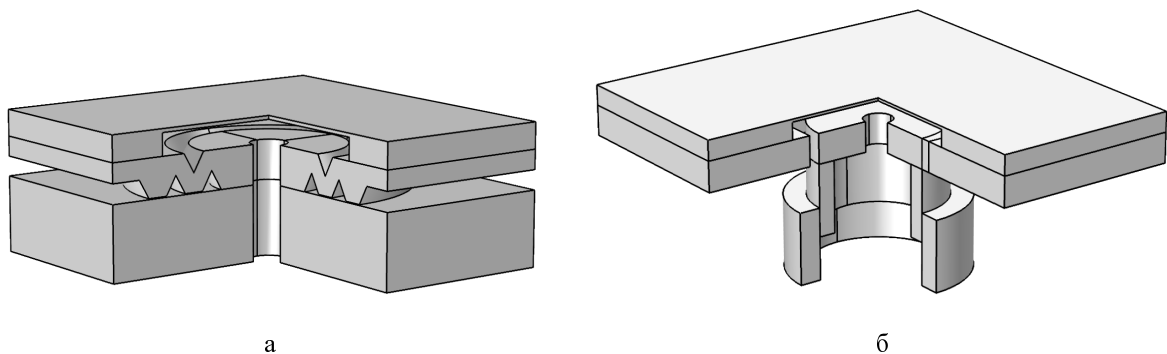


Рис. 2. ЧЭ МДД: а – опорный кристалл ЧЭ имеет форму гофрированной поверхности (модель III); б – закрепление опорного кристалла и мембраны ЧЭ осуществляется через подвес (модель IV)

Поддерживающие кристаллы, в конструкцию которых входят термокомпенсаторы упругих напряжений, формально можно разделить на два класса. В первый класс попадают кристаллы, способные компенсировать механические напряжения, действующие вдоль плоскости  $OXY$  (см. рис. 2, б и 3) (декартовой системы координат), во втором находятся те, которые также минимизируют напряжения в плоскости  $OXY$  с возможным задействованием направления вдоль оси  $OZ$  (см. рис. 2, а).

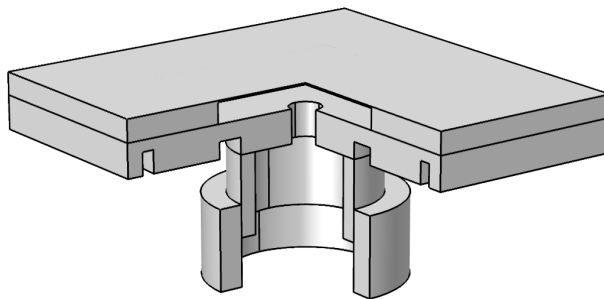


Рис. 3. Опорный кристалл ЧЭ имеет планарные термокомпенсаторы, закрепление осуществляется через керамическую трубку (модель V)

## Экспериментальная часть

### Расчет механических напряжений в опорном кристалле

При проведении расчетов механических напряжений в рассмотренных вариантах конструкций габаритные размеры и материалы, из которых они изготовлены, были взяты из описания действующих ЧЭ МДД (см. работу [3]). Чтобы учесть ряд тонких моментов математической модели, в итоговую конструкцию вошли следующие рабочие слои: кристалл с мембраной МДД, опорный кристалл, основание корпуса или керамическая трубка, которая является частью корпуса ЧЭ. Считалось, что ЧЭ изготовлен из монокристаллического кремния, как и опорный кристалл с термокомпенсаторами для моделей II–V. Для модели I кристалл с мембраной располагался на боросиликатном стекле. Основания корпусов у моделей I и III выполнены из ковара. У моделей II, IV и V закрепление в корпусе осуществляется через керамическую и медную трубочки, последняя вваривается в корпус.

Для выбора оптимальной конструкции среди образцов из разных классов расчет проводился для нескольких схожих моделей. Далее приведены результаты моделирования методом конечных элементов для опорных кристаллов, обладающих наиболее оптимальными функциональными возможностями среди представителей из каждого класса.

Как показано на рис. 4, а если ЧЭ расположен на опорном кристалле из боросиликатного стекла, при изменении температуры (осуществляется разогрев основания, на котором располагается опорный кристалл) наблюдаются механические деформации мембраны, в результате которых мембрана испытывает отрицательный прогиб, направленный против действия потока газа. Подобное поведение мембраны наблюдается и у модели II, когда массивное основание из кремния располагается на керамической трубочке в отсутствие термокомпенсаторов. Итогом такого совместного воздействия со стороны механических напряжений, имеющих противоположные направления, станет падение уровня выходного сигнала, и у внешнего наблюдателя может возникнуть неверное предположение, что измеряемое давление потока газа снизилось. Ситуация повторяется и в области отрицательной температуры, но прогиб мембраны и действие механических напряжений в этом случае уже совпадают по направлению.

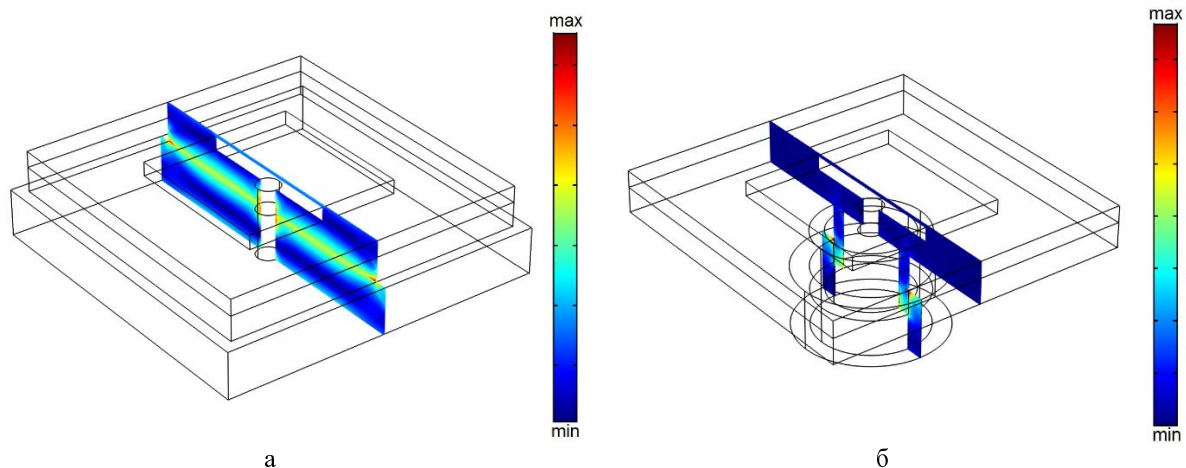


Рис. 4. Распределение механических напряжений в ЧЭ МДД для моделей I (а) и II (б)

В отличие от опорного кристалла, выполненного из стекла, где площадь соприкосновения кристалла мембраны максимальна, у модели III область контакта занимает не более 30 % от нижней грани основания, а у моделей II, IV и V 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 II, IV и V также не превышает 30 % от площади. Таким образом, уменьшение области контакта опорного кристалл с корпусом, как продемонстрировано на рис. 5 и 6, способствует снижению области распространения деформаций, что справедливо и для модели II. Однако, температурное расширение керамической трубки в случае модели II, на которой располагается опорный кристалл, в силу симметрии задачи приведет к начальной деформации мембраны ЧЭ, что, в свою очередь, также повлияет на выходные характеристики ЧЭ.

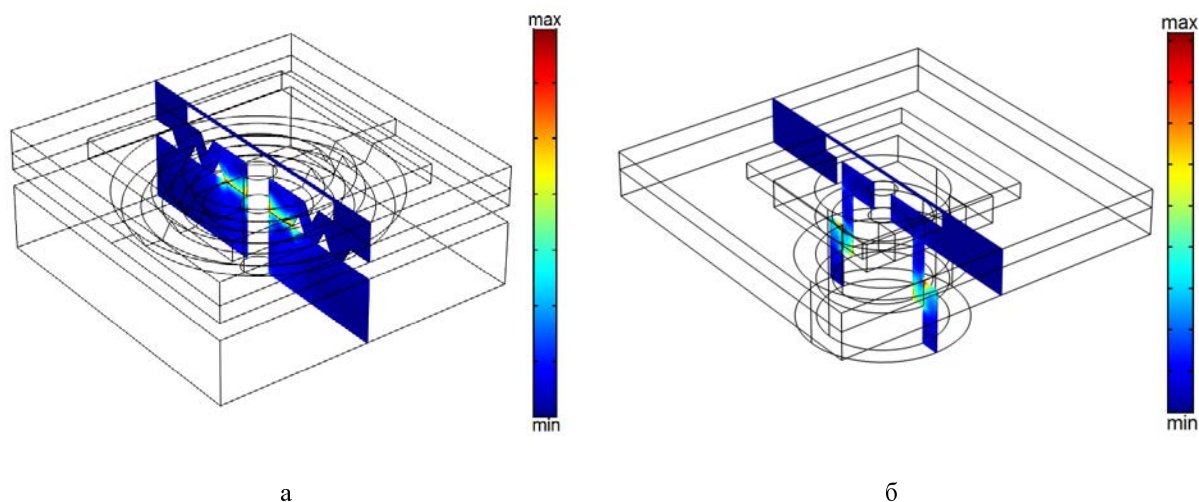


Рис. 5. Распределение механических напряжений в ЧЭ МДД для моделей III (а) и IV (б)

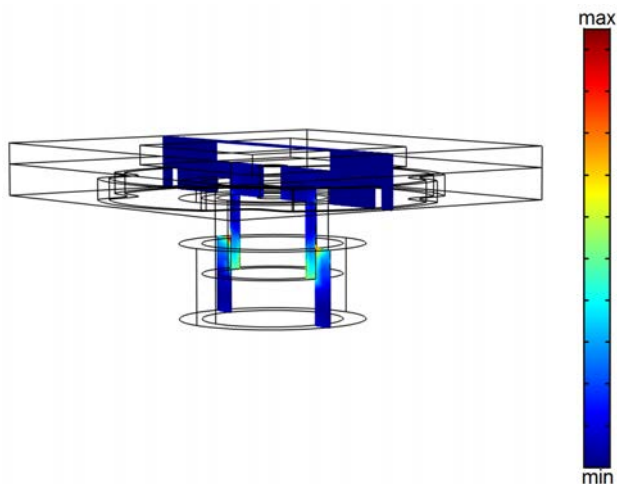


Рис. 6. Распределение механических напряжений в ЧЭ МДД для модели V

Опорный кристалл в форме гофрированной поверхности (модель III) обладает радиальной симметрией, и с увеличением расстояния относительно центра кристалла механические напряжения практически полностью релаксируют. Преимущество подобной конструкции заключается в том, что среди исследованных аналогов данный тип опорного кристалла наименее подвержен действию механических напряжений, связанных с температурными перепадами, ввиду того что вся гофрированная поверхность выступает в роли объемного термокомпенсатора. Согласно работе [7], вариация латеральных параметров опорного кристалла и толщины стенки гофрированной поверхности позволяет снизить напряженные состояния в материале до 95%. Помимо этого в конструкциях моделей III и V не требуется дополнительной герметизации и такой вариант ЧЭ подходит для датчика как абсолютного, так и дифференциального давления. Недостатками опорных кристаллов с гофрированной формой являются сложность в их изготовлении в части получения заданных кристаллографических плоскостей с помощью жидкостного травления с обеих сторон кристалла, их хрупкость при монтаже [3] и в областях высокой дефектности.

В сравнении с конструкцией модели III, в опорном кристалле модели IV, где связь с корпусом осуществляется через закрепленный подвес и трубочку, деформации, вызванные аналогичными температурными колебаниями, также минимальны и не влияют на работу ЧЭ. Все температурные изменения, связанные с внешней средой, на первом этапе поглощаются керамической трубкой, а уже затем подвесом, на конце которого имеется основание для закрепления на трубке. Достоинство такой конструкции заключено в простоте изготовления опорного кристалла, главными элементами которого являются основание крепления керамической трубки и плоский подвес, объединяющий основание с остальной частью кристалла. Радиальная симметрия основания и область, где оно располагается, позволяют выполнить механическую развязку с корпусом с минимальным взаимодействием через подвес. Сложности, обременяющие данный вид опорного кристалла и сам ЧЭ, связаны с тем, что для ЧЭ датчика абсолютного давления при такой конструкции необходимо будет изготовить дополнительную защитную крышку для герметизации мембраны ЧЭ. К тому же система, обладающая подвесом, даже с большой степенью жесткости, как в данном варианте, может выступать в качестве концентратора механических колебаний, что является отрицательным свойством конструкции.

Предложенная модель V опорного кристалл, исходя из его геометрических свойств, достаточно проста в изготовлении ввиду того, что модификация рельефа поверхности пластины требуется только с одной стороны. С точки зрения кремниевой технологии и его производства, подобное техническое решение имеет ряд преимуществ, поскольку минимизируются возможные технологические уходы и неточности. Геометрический вид термокомпенсаторов у кристалла представляет собой набор из концентрических колец сложной формы, конструкция не является сквозной, поэтому, как было указано выше, для данной модели не требуется дополнительная герметизация.

### ***Получение выходной характеристики ЧЭ МДД в условиях температурного колебания среды***

Для определения вклада от механических напряжений, которые могут передаваться на мембрану ЧЭ, и получения его выходной характеристики при температурных изменениях среды были выполнены следующие этапы по расчетам:

1) с помощью среды Comsol Multiphysics выполнена модель мембраны ЧЭ толщиной 20 мкм (рис. 7, а);

2) используя расчет областей наибольших деформаций мембраны, исходя из полученных данных, были выбраны области расположения тензорезисторов (рис. 7, б);

3) далее тензорезисторы ЧЭ были включены в мостовую схему, благодаря чему была получена выходная характеристика – зависимость выходного сигнала  $U_{out}$  от приложенного давления на мембрану;

4) получив выходную характеристику ЧЭ для случая, когда мембрана не испытывает механические напряжения, нами были учтены условия температурного разогрева–охлаждения, в результате чего построены характеристики, показанные на рис. 8.

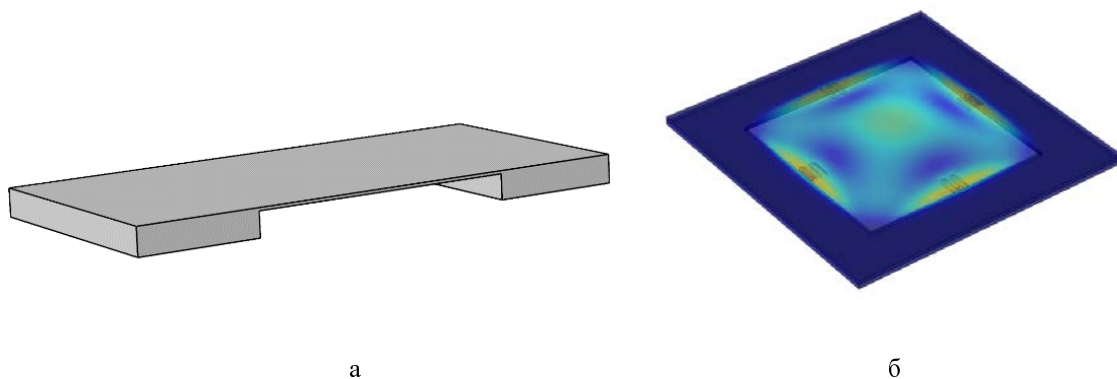
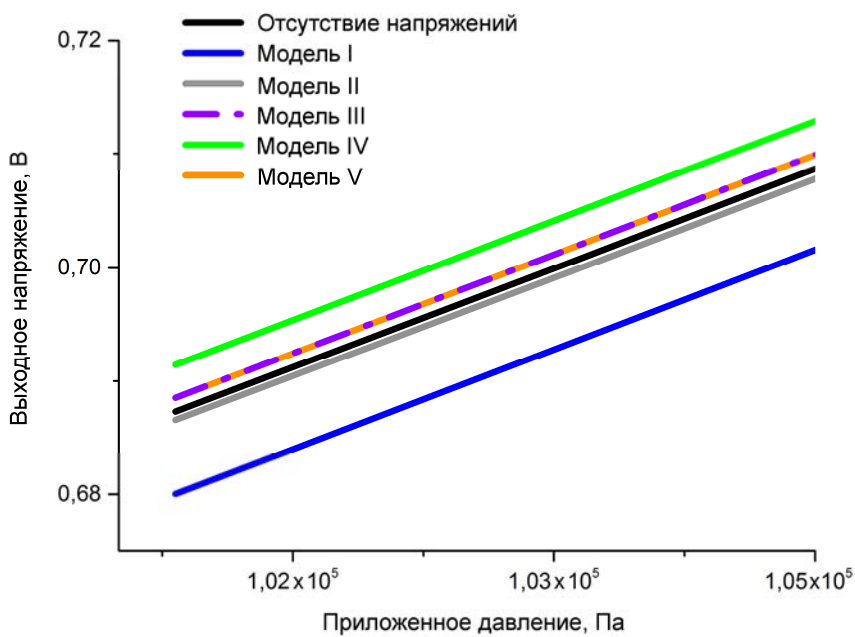
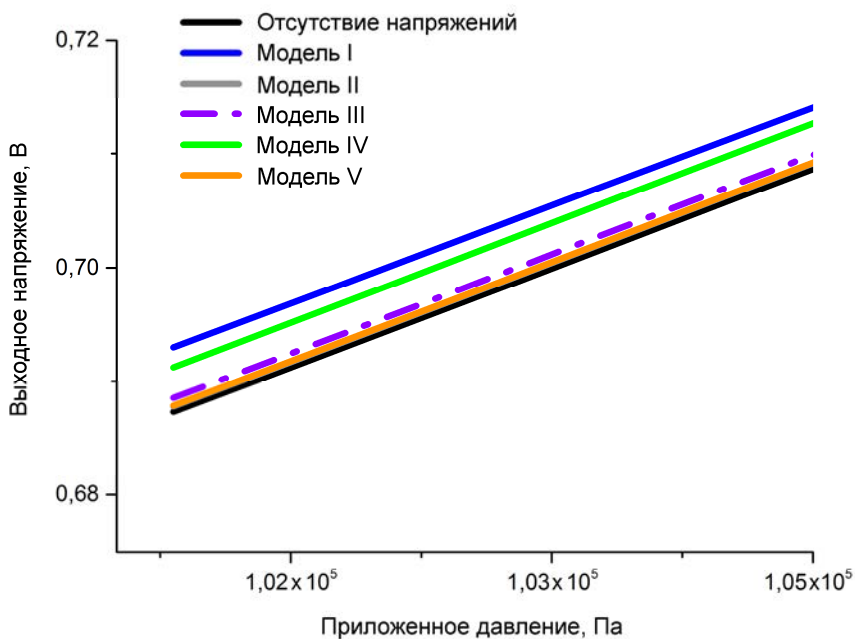


Рис. 7. Мембрана ЧЭ МДД: а – модель рассматриваемой мембраны ЧЭ; б – распределение механических деформаций и расположение тензорезисторов (тип меандр) в мембране



а



б

Рис. 8. Зависимость выходного сигнала  $U_{\text{out}}$  от приложенного давления на мембрану в условиях напряженного состояния опорного кристалла: а – система испытывает температурный разогрев; б – система испытывает температурное охлаждение



Согласно приведенным графикам (см. рис. 8) зависимость выходного сигнала для разных опорных кристаллов испытывает линейное смещение вдоль оси  $U_{out}$ , что связано с механическими напряжениями, вызванными температурными изменениями среды. Для моделей I и II в области положительной температуры наблюдается смещение вниз (см. рис. 8, а), что, как отмечалось ранее, является следствием противодействия двух типов механических напряжений. При отрицательной температуре уровень сигнала возрастает, что объясняется совпадением направлений действия внутренних и внешних напряжений (см. рис. 8, б). В случае модели III зависимость не изменяется на всем температурном диапазоне, что еще раз доказывает высокую эффективность опорных кристаллов ЧЭ, имеющих форму гофрированной поверхности. Характеристики моделей IV и V опорного кристалла испытывают незначительное смещение, что также подтверждает их эффективность в минимизации упругих полей при развязке ЧЭ с корпусом изделия.

## **Выводы**

В ходе работы было проведено исследование пяти типов опорных кристаллов. Анализ с помощью метода конечных элементов при температурном расширении–сжатии основания корпуса прибора показал, что для моделей I и II опорного кристалла необходимо строгое согласование тепловых коэффициентов расширения материалов между всеми слоями, входящими в систему мембрана–опорный кристалл–корпус, при этом выходной сигнал ЧЭ МДД для модели I в значительной степени зависит от температуры даже при небольших ее изменениях.

Среди всех предложенных моделей опорных кристаллов модель III показала наилучшие выходные характеристики, полученные от ЧЭ МДД, в которой наблюдается наименьшее механическое напряжение, передаваемое от основания корпуса к мембране ЧЭ. Минимальное значение передаваемых механических напряжений достигается через утонение стенки гофрированной поверхности опорного кристалла, что подробно рассмотрено в работе [6]. При этом особенности развитого рельефа опорного кристалла и используемый материал накладывают ряд технологических трудностей на его изготовление.

Проанализировав результаты расчетов и простоту конструкции моделей IV и V с точки зрения технологии производства, сделан вывод в пользу развития данного класса опорных кристаллов, имеющих в своей конструкции планарные термокомпенсационные элементы, поскольку данный вариант модели наименее емкий в производстве и наделен наилучшими прочностными характеристиками. Зависимости выходного сигнала  $U_{out}$  от приложенного давления ЧЭ на базе этих моделей находятся в слабой зависимости от температуры окружающей среды, что удовлетворяет выдвинутому требованию о минимизации нежелательных вкладов в выходную характеристику. Предложенная авторами модель V опорного кристалла применима для ЧЭ датчика как абсолютного, так и дифференциального давления, что делает ее более удачным решением среди рассмотренных опорных кристаллов.

## Список литературы

1. Offereins H. L., Sandmier H. Novel stress free assembly technique for micromechanical devices // Proc. of the Micro system technologies. 1990. 90. P. 515–520.
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. Beeby S., Ensel G., Kraft M., White N. MEMS mechanical sensors. Norwood: Artech house, 2004.
4. Mirza A., Ayon A. Silicon wafer bonding: key to MEMS high-volume manufacturing // Sensors. 1998. P. 24–33.
5. Vaganov V. L. Construction Problems in Sensors // Sensors and Actuators. 1991. Vol. A28. P. 161–172.
6. Spiering V. L., Bouwstra S., Spiering R. M. E. J. On-Chip decoupling zone for package-stress reduction // IEEE. 1991. P. 982–985.
7. Spiering V. L., Bouwstra S., Burger J. F. Membranes Fabricated with a Deep Single Corrugation for Package Stress Reduction and Residual Stress Relief // J. Micromech. Microeng. 1993. Vol. 3. P. 243–246.

## Method to Minimize Mechanical Stresses in a Sensitive Element of Micromechanical Devices Under Packaging

E. I. Volkova, P. A. Manin, S. A. Popkov

*Examines research results of mechanical stresses occurred in a sensitive element (SE) under package and mechanical stresses effect on output characteristics based on an exemplary pressure microsensor (PMS). The paper gives data on digital simulation of SE chip strain caused by thermal expansion – compression at packaging SE chip in the support chip-package system. It is being performed a search of a support chip structure which enables to diminish mechanical stresses under temperature variations assuring mechanical decoupling between SE itself and a device package.*