

УДК 539.3

И.А.Артамонов, Е.В.Переяславец (асп., каф. МПУ),
А.И.Боровков, к.т.н., проф., Е.Н.Пятышев, к.ф.-м.н, доц.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

Кремниевые датчики давления – первый и наиболее массовый коммерчески-успешный продукт микросистемных технологий. Микроэлектромеханические датчики давления находят новые сферы применения в таких важных промышленных отраслях как автомобильная и аэрокосмическая. Для этих и других приложений необходимо обеспечить высокую надежность, долговечность и стабильность функционирования наряду с минимальными габаритными размерами и высокими динамическими характеристиками. Характеристики разрабатываемого датчика должны отвечать требованиям автомобильных и аэрокосмических приложений, обладать высокой чувствительностью и стойкостью к перегрузкам по давлению. Для решения этой задачи необходимо проведение предварительного исследования напряженно-деформированного состояния и собственных колебаний чувствительного элемента датчика.

Рассматриваемый чувствительный элемент микродатчика давления тензометрического типа представляет собой прямоугольный чип с квадратной мембраной и жестким центром (рис.1). Габаритные размеры датчика – 3х3х0.4 мм; плоскость мембраны имеет размеры 1х1 мм и толщину 1 мкм. Размеры жесткого центра варьируются от 0.2х0.2х0.1 мм до 0.5х0.5х0.1 мм с шагом 0.1 мм. Материал основания и жесткого центра – монокристаллический кремний, материал мембраны – двуокись кремния (кварц). Физико-механические свойства материалов чувствительного элемента: $E_{Si} = 160$ ГПа, $E_{SiO_2} = 67$ ГПа – модули Юнга; $\rho_{Si} = 2.33 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, $\rho_{SiO_2} = 2.2 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³ – плотности; $\alpha_{Si} = 3.3 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, $\alpha_{SiO_2} = 5.1 \cdot 10^{-7}$ К⁻¹ – коэффициенты линейного температурного расширения; $\nu_{Si} = 0.27$, $\nu_{SiO_2} = 0.155$ – коэффициенты Пуассона. Все конечно-элементные (КЭ) расчеты проводились с помощью программной системы КЭ анализа ANSYS 5.5.

На рис. 2 приведены зависимости максимальных прогибов мембраны от статической нагрузки – равномерно распределенного давления P_0 – для разных жестких центров. При этом учитывается пространственное напряженно-деформированное состояние, возникающее в результате остывания мембраны от температуры формирования 1200°C до комнатной температуры. Для сравнения приведены результаты для плоской (без жесткого центра) мембраны таких же размеров. Закономерным результатом является уменьшение угла наклона полученных линейных зависимостей при увеличении размеров жесткого центра, что ведет к росту диапазона измеряемых давлений. Таким образом, самым широким диапазоном измеряемых давлений обладает мембрана с самым большим жестким центром 0.5х0.5х0.1 мм.

На следующем этапе исследований проведен анализ чувствительности и выбор оптимальной конфигурации чувствительного элемента. Для этого определена зависимость

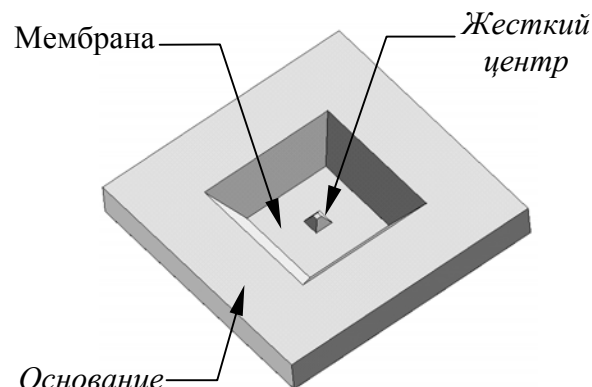


Рис. 1.

эквивалентных (по Мизесу) деформаций мембраны $\varepsilon_{экр}$ от рабочих нагрузок для разных размеров жесткого центра (рис. 3). Оценка чувствительности производилась по наибольшим эквивалентным деформациям. Из рис. 3 можно сделать вывод, что максимальной чувствительностью обладают мембраны с размерами жестких центров

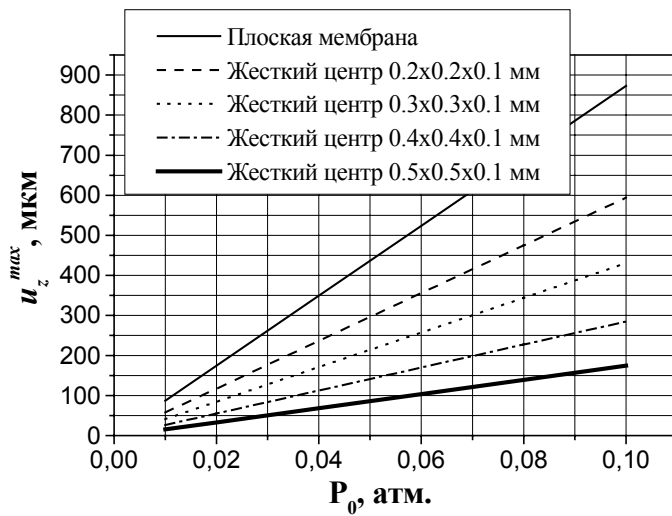


Рис. 2

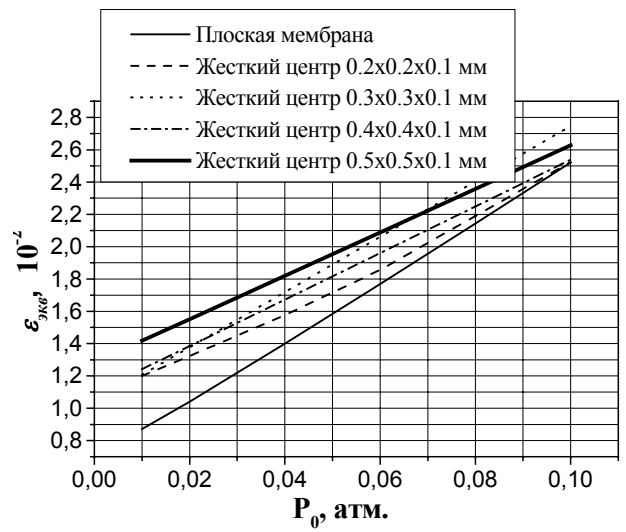


Рис. 3

0.3x0.3x0.1 мм и 0.5x0.5x0.1 мм. Сравнивая эти две мембраны между собой, видно, что мембрана с жестким центром 0.5x0.5x0.1 мм имеет преимущество: за счет максимальной жесткости возрастание прогибов при увеличении давления происходит более медленно, что позволяет расширить диапазон измеряемых давлений.

Исследование собственных колебаний мембраны чувствительного элемента необходимо для того, чтобы определить рабочий частотный диапазон всего датчика давления в целом. Расчет собственных частот в рамках программной системы КЭ анализа ANSYS 5.5 производился с помощью блочного метода Ланцоша. В силу симметрии рассматриваемой системы в спектре появляются кратные собственные частоты. В ходе исследований размеры жесткого центра варьировались от 0.2x0.2x0.1 мм до 0.5x0.5x0.1 мм. На рис. 4 представлена гистограмма зависимости первой собственной частоты мембраны от размеров жесткого центра. Из приведенной гистограммы видно, что мембраны с размерами жестких центров 0.2x0.2x0.1 мм и 0.5x0.5x0.1 мм обладают наилучшими спектральными свойствами.

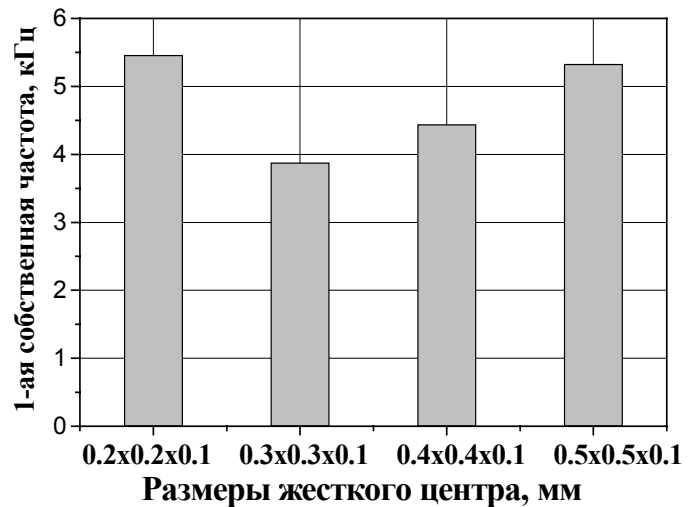


Рис. 4

На основании проведенного расчетного исследования можно заключить, что оптимальной геометрией обладает чувствительный элемент с наибольшим жестким центром из заданного набора размеров, хотя и не обладающий максимальной чувствительностью в некотором диапазоне нагрузок.