УДК 681.586.2

# КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ УПРУГОГО ПОДВЕСА ДАТЧИКА УГЛА НАКЛОНА С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

Корсак К.В., Новиков П.Э., Шляев В.А., Баранова М.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, k.korsak@bsuir.by

Аннотация: выполнен конечно-элементный анализ деформации упругого подвеса датчика угла наклона в среде ANSYS. Построена геометрическая модель «опора – балка» из монокристаллического кремния. Проведено сравнение максимальной деформации подвеса квадратного сечения 20 × 20 мкм и эллиптического сечения площадью 100 мкм$^2$ при воздействии распределенной нагрузки, эквивалентной проекции ускорения свободного падения. Показано, что эллиптическое сечение обеспечивает увеличение деформации в 3,2 раза (с 31,4 до 101,8 мкм) без изменения длины подвеса.

Ключевые слова: МЭМС, подвес, деформация, эллиптическое сечение, метод конечных элементов, кремний, датчик угла наклона.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Упругий подвес является ключевым элементом конструкции МЭМС-датчиков угла наклона [1, 2], поскольку его изгибная жесткость определяет перемещение инерционной массы при наклоне и, как следствие, чувствительность емкостного датчика. Геометрия поперечного сечения подвеса непосредственно влияет на его жесткость на изгиб. Цель работы – конечно-элементный анализ деформации подвеса МЭМС-датчика угла наклона и оценка влияния формы поперечного сечения на величину максимального перемещения свободного конца.

## II. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИИ

Создана упрощенная модель «опора – балка» для верификации геометрии и предварительной оценки жесткости подвеса. Опора выполнена в виде прямоугольной призмы, балка примыкает к ней без зазора. Тела объединены операцией логического сложения, что соответствует формированию структуры из единого слоя кремния. Материал – монокристаллический кремний (ρ = 2320 кг/м$^3$, E = 130 ГПа, ν = 0,28) [3]. Конечно-элементная сетка уточнялась в зоне закрепления балки. Геометрическая модель подвеса квадратного сечения приведена на рис. 1.

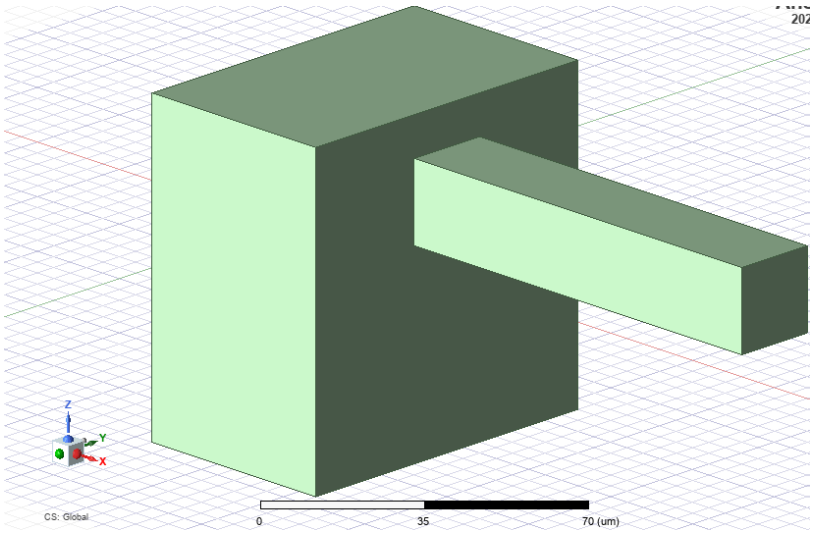



Рисунок 1. Геометрическая модель подвеса с квадратным поперечным сечением 20 × 20 мкм и опорой

В модуле статического структурного анализа на опору наложено условие жесткого закрепления, на свободный конец балки приложена распределенная нагрузка, эквивалентная воздействию инерционной массы при проекции ускорения свободного падения (1 g) на чувствительную ось, направленная перпендикулярно оси подвеса. Распределение деформации в подвесе квадратного сечения показано на рис. 2. Максимальная деформация составила 31,4 мкм.

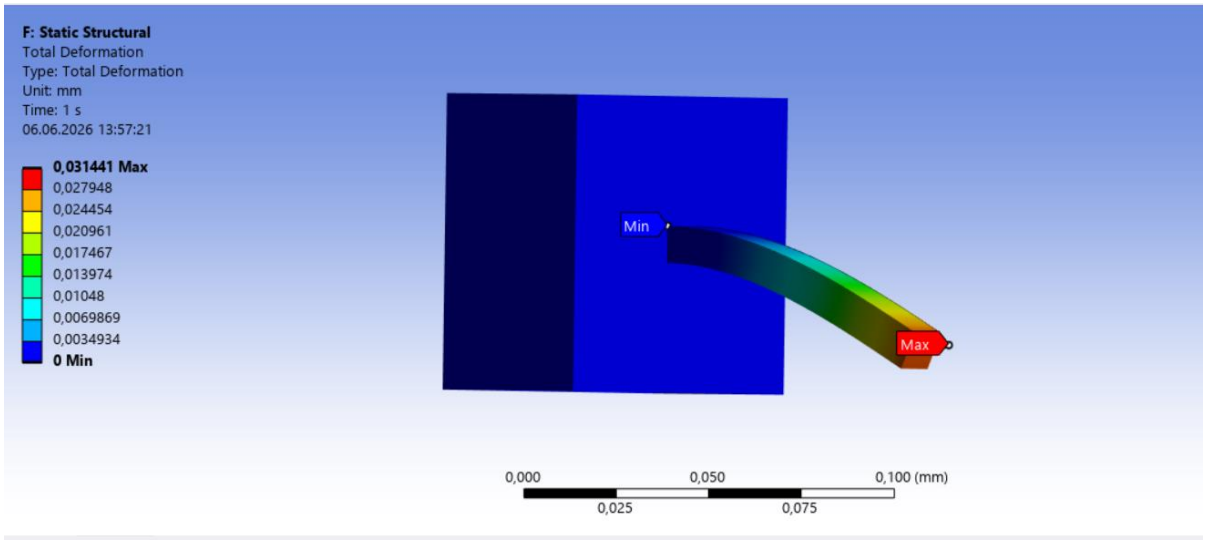



Рисунок 2. Распределение деформации в подвесе квадратного сечения при нагрузке, эквивалентной 1 g

Для увеличения деформации без изменения длины подвеса рассмотрено эллиптическое поперечное сечение площадью 100 мкм$^2$ (большая ось 20 мкм, малая ось 6,4 мкм), ориентированное малой осью в направлении измерительной деформации. Уменьшение момента инерции сечения относительно оси изгиба снижает изгибную жесткость. Максимальная деформация составила 101,8 мкм, что в 3,2 раза превышает значение для квадратного сечения при идентичных граничных условиях.

## III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен конечно-элементный анализ деформации упругого подвеса МЭМС-датчика угла наклона. Показано, что замена квадратного поперечного сечения 20 × 20 мкм на эллиптическое сечение площадью 100 мкм$^2$ обеспечивает увеличение максимальной деформации свободного конца с 31,4 до 101,8 мкм (в 3,2 раза) при сохранении длины подвеса. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения эллиптического сечения для повышения чувствительности МЭМС-датчиков угла наклона.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Wang, S. A Novel Single-Axis MEMS Tilt Sensor with a High Sensitivity in the Measurement Range from 0° to 360° / S. Wang, X. Wei, Y. Weng [et al.] // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 2. Art. 346. DOI: 10.3390/s18020346.

[2] Zou, X. A high-resolution micro-electro-mechanical resonant tilt sensor / X. Zou, P. Thiruvenkatanathan, A. A. Seshia // Sensors and Actuators A: Physical. 2014. Vol. 220. P. 168–177. DOI: 10.1016/j.sna.2014.10.004.

[3] Пайн Со Хту. Моделирование и оптимизация емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа / Пайн Со Хту, В. В. Калугин, Е. С. Кочурина // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 4. С. 452–460. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460.

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE DEFLECTION OF A MEMS TILT SENSOR ELASTIC SUSPENSION WITH AN ELLIPTICAL CROSS-SECTION

K. Korsak, P. Novikov, V. Shlyaev, M. Baranava

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
k.korsak@bsuir.by

Abstract: a finite element analysis of the deflection of a MEMS tilt sensor elastic suspension was performed in ANSYS. A geometric model "support – beam" made of single-crystal silicon was constructed. Comparison of the maximum deflection of a suspension with a 20 × 20 μm square cross-section and an elliptical cross-section of 100 μm² area under a distributed load equivalent to the gravitational acceleration projection showed a 3.2-fold increase in deflection (from 31.4 to 101.8 μm) without changing the suspension length.

Keywords: MEMS, suspension, deflection, elliptical cross-section, finite element method, silicon, tilt sensor.