

Таблица 2 – ширина подвеса 500 мкм

Толщина подвеса, мкм	20	30	40
Частота 1-ой моды, Гц	83	152	234
Максимальное отклонение, мкм	52,05	15,538	6,59
Максимальное механическое напряжение, МПа	6,68	3,053	1,74



Рисунок 3 – Максимальная отклонение инерционной массы, ширина подвеса 500 мкм, толщина 30 мкм

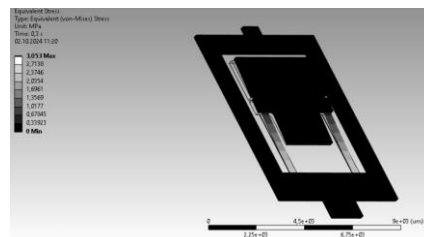


Рисунок 4 – Распределение механических напряжений в подвесах чувствительного элемента, при ширине подвеса 500 мкм, толщине 30 мкм

Данная работа была выполнена в ходе выполнения НИР 3.17.1 по ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций».

Литература

1. Распопов В.Я Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2004.

УДК 53.087.93

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОВЫХ МИКРОСИСТЕМ

Антонов М. С., Реутская О. Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Компьютерное моделирование и анализ полученных результатов позволяет учитывать особенности при изготовлении чувствительных элементов газовых микросистем с применением микроэлектронных технологий. В результате конечно-элементного моделирования в программе ANSYS 2023 было определено влияния температуры на распределение тепловых полей, деформации и механических напряжений в порожках пористого оксида алюминия. Установлены зависимости деформации и механических напряжений от температуры. **Ключевые слова:** Компьютерное моделирование, газовая микросистема, температура, деформация, механическое напряжение.

COMPUTER ANALYSIS OF SENSITIVE ELEMENTS OF GAS MICROSYSTEMS

Antonov M., Reutskaya O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Computer modeling and analysis of the obtained results allows taking into account the features in the manufacture of sensitive elements of gas microsystems using microelectronic technologies. As a result of finite element modeling in the ANSYS 2023 program, the influence of temperature on the distribution of thermal fields, deformation and mechanical stresses in porous aluminum oxide substrates was determined. Dependences of deformation and mechanical stresses on temperature were established.

Key words: Computer modeling, gas microsystem, temperature, deformation, mechanical stress.

*Адрес для переписки: Антонов М. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: matvey3378@gmail.com.*

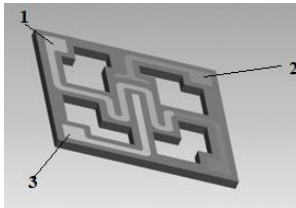
Развитие промышленности интенсивными темпами приводит к увеличению нагрузки на техногенную среду, к реальной угрозе здоровью людей и нанесению невосполнимого ущерба. В странах с развитой промышленностью уделяется особое внимание созданию и разработке газоаналитического оборудования и систем мониторинга окружающей среды. В основу таких систем следует включать газоаналитические приборы на основе газовых сенсоров, для создания которых используют современные микроэлектронные технологии. Они способны обеспечивать высокий и эффективный контроль за процессами загрязнения воздуха.

Разработка новых датчиков для обнаружения различных газов в окружающей среде включает в себя ряд этапов. Одним из них является построение и анализ компьютерной модели в системах автоматического проектирования. Включение такого этапа в разработку позволяет снизить стоимость создаваемого изделия. Для исследования элементов газовых микросистем была построена модель сенсора на подложке пористого оксида алюминия при помощи программы ANSYS 2023.

Выбор режимов работы газовых микросистем определяется рядом параметров, включающих тепловые потери и распределения температурных полей в чувствительном элементе сенсоров. Диа-

пазон измерения газов зависит от температуры нагрева чувствительной части сенсора. В свою очередь тепловые потери определяют мощность потребления датчиков.

При выполнении данной работы было проведено моделирование элементов газовой микросистемы на подложке пористого оксида алюминия толщиной 60 мкм. На «рисунке 1» изображена построенная модель чувствительного элемента газовой микросистемы, выполненной на подложке пористого Al_2O_3 , характеристики которого представлены в таблице 1.



1 – Нагревательный элемент; 2 и 3 – информационные электроды

Рисунок 1 – Модель чувствительного элемента газовой микросистемы выполненной на подложке пористого Al_2O_3

Таблица 1– Основные характеристики пористого оксида алюминия в прамме расчета ANSYS 2023

КТЛР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}$	Модуль Юнга E, ГПа	Удельная теплоемкость, Дж/Кг*К	Теплопроводность, Вт/м*К	Плотность, г/см ³
5,2	447	750	25	3,9

При расчете применялись следующие параметры: тетрагональная сетка с количеством узлов – 416200, количество элементов сетки – 225788, минимальный размер элемента сетки – 0,099 мкм. Подложка выполнена из пористого оксида алюминия толщиной 60 мкм. Электроды выполнены из платины толщиной 0,5 мкм. Зазор между нагревателем и информационными электродами составил 10 мкм. На нагреватель подавалась температура 400 °С. Выбор диапазона рабочих температур определялся режимами обнаружения горючих и токсичных газов [1].

На рисунках 2, 3 и 4 представлены результаты моделирования элемента микросистемы при температуре нагрева 400 °С.

Как видно из рисунка 2 процесс распределения температуры происходит равномерно.

Полученное поле деформации показывает, что ее разделение симметрично и отличается незначительно относительно элементов сенсора при воздействии температуры 400 °С (рисунк 3). Из рисунка 4 видно, что возникающее напряжения не превышает предельного значения и составляет $E = 447$ ГПа.

В результате проведенных расчетов и моделирования тепловых процессов в чувствительных элементах микросистемы, установлены зависимости изменения деформации и механического

напряжения от температуры, которые представлены на рисунках 5 и 6 соответственно.

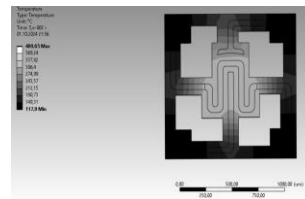


Рисунок 2 – Распределения тепловых полей в чувствительном элементе микросистемы при температуре 400 °С

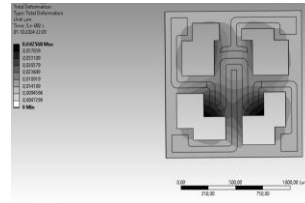


Рисунок 3 – Поле деформации, возникающее в чувствительном элементе микросистемы при воздействии 400 °С

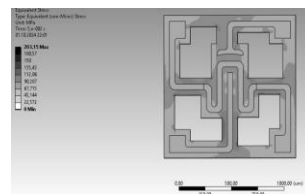


Рисунок 4 – Поле механических напряжений в чувствительном элементе газовой микросистемы при воздействии температуры 400 °С

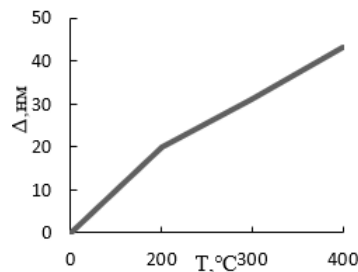


Рисунок 5 – Зависимость изменения деформации от температуры в чувствительном элементе газовой микросистемы

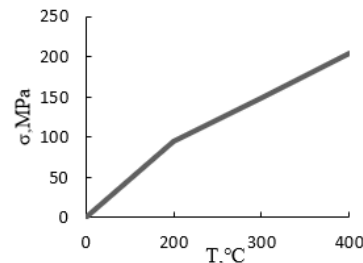


Рисунок 6 – Зависимость механического напряжения от температуры в чувствительном элементе газовой микросистемы

Полученные результаты моделирования были использованы для разработки и создания макетов газовых сенсоров с применением лазерной технологии обработки поверхности диалектических пластин.

Литература

1. Девясилов, В. А. Теория горения и взрыва : практикум / В. А. Девясилов, Т. И. Дроздова, С. С. Тимофеева // учебное пособие под общ. ред. В.А. Девясилова. – М. : ФОРУМ, 2012. – 352 с.

УДК 621.763.893

3D-ПЕЧАТЬ НАНООБЪЕКТОВ

Антонов М. С.¹, Чижик С. А.^{1,2}

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Создание неорганических материалов с разработанными трехмерными наноструктурами – быстро развивающаяся область исследований и промышленного применения. В данной работе проведен анализ современных методов 3D-печати высококачественных наноструктур. И предложен новый метод с использованием атомно силового микроскопа и двухфотонной полимизации для создания объектов из SiO₂ с разрешением менее 200 нм и гибкой возможностью легирования редкоземельными элементами.

Ключевые слова: МЭМС, 3D-печать, нанокompозитные чернила, двухфотонная полимеризация.

3D-PRINTING NANOOBJECTS

Antonov M.¹, Chizhik S.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Heat and Mass Transfer NAS of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The creation of inorganic materials with developed three-dimensional nanostructures is a rapidly developing field of research and industrial applications. In this paper, an analysis of modern methods of 3D printing of high-quality nanostructures is carried out. And a new method has been proposed using atomic force microscope and two-photon polymerization to create SiO₂ objects with a resolution of less than 200 nm and a flexible possibility of alloying with rare earth elements.

Key words: MEMS, 3D printing, nanocomposite ink, two-photon polymerization.

Адрес для переписки: Антонов М. С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: matvey3378@gmail.com

Наноструктурированные неорганические материалы имеют многообещающий потенциал применения и привлекли огромное внимание исследователей как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Диоксид кремния (SiO₂) является одним из наиболее широко используемых неорганических материалов, для изготовления которого требуются методы с наноразмерным разрешением в таких областях, как микроэлектроника, микроэлектромеханические системы (МЭМС) и микрофотоника. Для получения неорганических материалов с желаемыми наноструктурами обычно требовались сложные процессы формирования структуры «сверху вниз», включающие термическое окисление и химическое осаждение из газовой фазы, за которыми следовали этапы сухого или мокрого травления [1].

Были разработаны методы обработки с высоким выходом такие как фотолитография, электро-взрыв, нестехеометрическое соединение и т. д. Эти методы включают использование опасных химикатов (например, резистов, проявителей, травителей и т. д.) и требуют сложных установок для изготовления. Более того, достижение сложных и/или асимметричных трехмерных (3D) архи-

тектур с нанометровым разрешением является сложной задачей при использовании методов изготовления «сверху вниз». Таким образом, растет спрос на прямые нанотехнологии производства, которые могут производить трехмерные неорганические структуры со сложной геометрией и химической изменчивостью [1].

Аддитивное производство (АП), также известное как 3D-печать, за последнее десятилетие приобрело популярность. АП – это технология производства «снизу вверх», которая позволяет создавать более сложные конструкции и потенциально снижает дефекты материала, которые в противном случае возникли бы в результате литья или литья под давлением. Одним из основных преимуществ 3D-печати является быстрое создание прототипов, которое снижает затраты и ускоряет процесс разработки и внедрения новых технологий и продуктов. АП все еще находится на ранней стадии внедрения, но его рост составляет 25 % в год [2].

Широкую популярность приобрели такие методы 3D-печати как [3]:

– лазерное спекание порошков (selective laser sintering, SLS);