

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 университет²Институт 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 University²Heat 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, электровзрыв, 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);

- лазерная стереолитография (stereo laser lithography, SLA);

- ламинирование листовых материалов (laminated object manufacturing, LOM);

- экструзионная печать или технология послойного наплавления материала (fused deposition modeling, FDM).

Новым развивающимся методом наноразмерной 3D-печати является комбинированное использование атомно-силового микроскопа (АСМ) и двухфотонной полимеризации. Метод включает в себя нанесение при помощи АСМ высокодисперсных нанокompозитных чернил, функционализированных коллоидным кремнеземом, с использованием технологии двухфотонной полимеризации для спекания полимера. Важно отметить, что АСМ являются не только мощным исследовательским инструментом, но также позволяют проводить модификацию поверхности (силовая литография, электрическая модификация, локальное анодное окисление, «зарядовое письмо», dip-rep нанолитография), а также манипулировать микро- и нанообъектами на поверхности (манипуляция атомами, нанотрубками, различными органическими молекулами, биологическими объектами). Таким образом, методы АСМ обеспечивают решение задачи в различных областях науки и техники (микроэлектроника, материаловедение, приборостроение, фармацевтика, химия, биология, биохимия, медицина, геология и др.) [3].

Двухфотонная фотополимеризация, технология прямой записи на основе лазера, при которой полимер инициирует свободнорадикальную полимеризацию путем одновременного поглощения двух фотонов. После двухфотонной фотополимеризации, используется пиролиз и спекание, эти процедуры последующей обработки определяют кристалличность полученных структур [4].

Для создания 3D-нанообъектов используются специальные «нано-чернила» (НЧ). Такие чернила должны соответствовать нескольким условиям. Во-первых, размер частиц кремния в нанокompозитных чернилах должен быть небольшим (около 10 нм) для достижения наномасштабного разрешения. Во-вторых, показатель преломления фотополимерной смеси прекурсоров должен соответствовать показателю преломления кремния для получения прозрачных чернил, для устранения фотозатухания и рассеивания. В-третьих, теплопроводность нанокompозитных чернил должна быть высокой, чтобы избежать мгновенного испа-

рения. В-четвертых, чернила должны быть однородными и хорошо диспергированными для поддержания наномасштабного разрешения, а также для предотвращения локализованного испарения. В-пятых, массовая загрузка неорганических НЧ должна быть высокой для поддержания напечатанной геометрии и минимизации деформации [5].

На рисунке 1 представлено изображение образца дисковой конструкции на ферменных опорах полученное с помощью растрового электронного микроскопа.

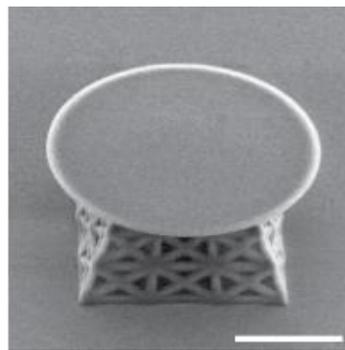


Рисунок 1 – Дисковая конструкция на ферменных опорах, (масштабная линейка 10 мкм) [1].

Таким образом использование АСМ, нанокompозитных чернил и двухфотонной полимеризации позволяет создавать высококачественные неорганические наноструктуры. Метод обеспечивает возможность 3D-печати неорганических кремниевых структур с разрешением менее 200 нм с контролируемой кристалличностью и легированием. Данный метод можно использовать в микроэлектронике, микрофотонике, для создания микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Литература

1. 3D-printed silica with nanoscale resolution / X. Wen [et al.] // *Nat. Mater.* – 2021. – V. 20. – P. 1506–1511.
2. Wohlers Associates. Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Fort Collins, Co. – 2018.
3. Пермяков, Н. В Развитие аппаратно-методических средств атомно-зондовой технологии для получения и диагностики наноразмерных объектов : дис. канд. тех. наук: 05.27.06. – М., СПб., 2018. – 180 с.
4. Mueller, B. Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing / B. Mueller // *Assembly Automation.* – 2012. – V. 32, № 2.
5. Additive manufacturing: applications and directions in photonics and optoelectronics / A. Camposeo [et al.] // *Adv. Opt. Mater.* – 2019. – V. 7. – P. 1800419.