

Научная статья
УДК 621.9.048.7
DOI: 10.34759/vst-2022-2-228-236

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА КВАРЦЕВЫХ НАНОПОРОШКОВ

Павел Александрович Вятлев¹, Валентин Константинович Сысоев², Андрей Дмитриевич Юдин³ ✉

^{1,2,3}Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
Химки, Московская область, Россия

¹vyatlev@laspace.ru

²sysoev@laspace.ru

³yudin@laspace.ru ✉

Аннотация. Рассмотрены особенности процесса получения нанопорошков диоксида кремния из кварцевых стержней под воздействием излучения CO₂-лазера. Показано, что получаемые порошки аморфны, сферической формы с размерами порядка 80 нм. Особенностью процесса синтеза данных продуктов является образование в камере синтеза агломератов и закиси азота. Приведён анализ области применения данных порошков.

Ключевые слова: кварцевые нанопорошки, лазерное излучение, закись азота

Для цитирования: Вятлев П.А., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Анализ процесса лазерного синтеза кварцевых нанопорошков // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 228-236. DOI: 10.34759/vst-2022-2-228-236

Original article

ANALYSIS OF QUARTZ NANO-POWDERS LASER SYNTHESIS PROCESS

Pavel A. Vyatlev¹, Valentin K. Sysoev², Andrei D. Yudin³ ✉

^{1,2,3}Lavochkin Research and Production Association,
Khimki, Moscow region, Russia

¹vyatlev@laspace.ru

²sysoev@laspace.ru

³yudin@laspace.ru ✉

Abstract

Synthesis and study of nano-powders properties of various oxide materials is an important problem in modern materials science. The quartz glass possesses a unique combination of characteristics, such as high melting point, high heat resistance, chemical inertness, and optical transparency. The said stipulates the interest in the preparation and study of nano-powders from this material.

One of the successful methods for obtaining nanopowders is the solid inorganic substances evaporation under the action of electron beams with subsequent condensation. The purpose of this work consists in analyzing the process of obtaining silicon dioxide nano-powders based on high-intensity evaporation of quartz glass under the impact of CO₂-laser radiation (10.6 μm), and studying the products of this reaction.

The subject of the study in this work is the process of evaporation from the surface of quartz glass under the impact of focused laser radiation from a CO₂-laser of a 100 W power. The evaporation rate was being controlled by changing the laser beam power, the rotation speed, and the linear feed of the quartz rod. With the CO₂-laser power increasing up to 5 kW, SiO₂ nano-powder obtaining with a productivity of up to 5 kg/h is possible.

Radiation, absorbed in a thin layer of quartz glass, heats it up to evaporation temperatures without the liquid phase formation. Quartz glass evaporates in the plasma state.

A brightly luminous plasma, which leads to the NO₂ gas forming, is being formed in the process of quartz nano-powders obtaining in the zone of material evaporation under the impact of the focused laser radiation.

The sizes and phase composition of nanoparticles, as well as the specific surface area and optical properties of nanopowders, were studied. The spherical structure of the quartz powder particles is visible, which indicates a liquid-drop mechanism of evaporation. The size distribution has its maximum at 80 nm. The chemical composition of the silicon dioxide powders corresponds to the chemical composition of the feedstock, and, unlike industrial grades of silicon dioxide powders, they do not contain chlorine and fluorine.

Analysis of the obtained silicon dioxide nanopowders application revealed the possibility of their employing in high-quality polishing, cleaning, grinding friction pairs of high-precision mechanisms technologies, as well as an additive in composite polymer materials and lunar soil simulators.

Keywords: quartz nano-powders, laser radiation, nitrous oxide

For citation: Vyatlev P.A., Sysoev V.K., Yudin A.D. Analysis of Quartz Nano-Powders Laser Synthesis Process. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 228-236. DOI: 10.34759/vst-2022-2-228-236

Введение

Развитие технологий синтеза нанопорошков из тугоплавких оксидов металлов, например диоксида кремния, является одним из направлений современного материаловедения. Нанопорошки оксидов металлов востребованы при создании новых композитных материалов — нанокерамики, полимерных композитов. Такие композитные материалы могут обладать физико-химическими свойствами, достаточными для их применения в космических аппаратах.

Однако создание композитных материалов предъявляет к характеристикам таких нанопорошков высокие требования: высокая химическая чистота, моносферность, аморфность [1]. Одним из такого рода наноматериалов, обладающим характеристиками, позволяющими применять его в том числе для изготовления композитных материалов, является нанодисперсный порошок диоксида кремния SiO₂ [2].

Технология получения нанопорошков оксидов металлов весьма разнообразна и делится на физические и химические способы, например

механические (дробление), плазменно-дуговые, пиролиз, плазмохимические и т.д.

Освоено множество видов нанопорошков с разнообразными физико-химическими свойствами, однако детальный анализ рынка предложений этих наноматериалов показывает, что наиболее востребованным является нанопорошок диоксида кремния (SiO₂). В период 2010—2020 гг. он составлял половину от общемирового производства нанопорошков.

Из всего многообразия технологий получения нанодисперсного порошка диоксида кремния наиболее массово промышленно освоена методика химического осаждения из газовой фазы (Chemical Vapour Deposition — CVD) [3].

Сегодня лидером на рынке нанодисперсного диоксида кремния является порошок, производимый компанией Evonik Industries AG (Германия), занимающейся синтезированием нанодисперсного порошка диоксида кремния под маркой «аэросил» (AEROSIL) [4]. Аэросил представляет собой очень чистый аморфный диоксид кремния с размером частиц от 5 до 40 нм. Час-

тицы аэросила образуют физические хлопьевидные агрегаты, это приводит к тому, что объем аэросила фактически на 98% заполнен воздухом: если пикнометрическая плотность SiO_2 составляет $2,2 \text{ г/см}^3$, то насыпная плотность аэросила порядка $0,04\text{--}0,06 \text{ г/см}^3$, удельная поверхность более $300 \text{ м}^2/\text{г}$, а средний диаметр наночастиц — 5 нм [5].

В России малотоннажное производство подобной продукции разрабатывает ООО «Экокремний» [6].

Существенными недостатками имеющихся массовых методов получения порошков диоксида кремния являются использование химически активных, опасных и ядовитых веществ, таких как галогены кремния (SiCl_4), и проведение синтеза в несколько стадий.

Разработка новых нанокompозитных материалов с применением диоксида кремния требует от него характеристик, отличных от аэросила, а именно более высокой монодисперсности, химической чистоты, аморфности и сферической формы наночастиц.

Химико-физические свойства порошков и, как следствие, область их применения во многом зависят от способа их получения. Поэтому требуется разработка новых методов получения диоксида кремния.

Воздействие мощных электронных пучков на твердые оксидные материалы, чаще всего кварцевые пески, приводит к испарению этих материалов с последующей конденсацией в виде порошка. Однако данная технология весьма энергозатратная и требует сложных устройств для создания электронных пучков и вакуумного оборудования [7, 8].

Другой методикой получения нанопорошков диоксида кремния является технология воздействия инфракрасного лазерного излучения на оксид кварца (кварцевого стекла), что приводит к его испарению с образованием порошка [9].

Так как чистое кварцевое стекло обладает заведомо высокой химической чистотой, то испарение его приводит к образованию высокочистых нанопорошков. В отличие от электронных пучков испарение кварцевого стекла с помощью лазерного излучения можно производить в воздухе, чем обусловлен интерес к получению и исследованию нанопорошков по данной технологии. Поэтому детальный анализ методики получения нанодисперсных порошков диоксида кварца с помощью лазерного излучения является актуальной задачей.

Воздействие инфракрасного CO_2 -лазера ($10,6 \text{ мкм}$) на кварцевые стекла приводит к ряду теплофизических эффектов и их комбинаций. Во-первых, известно, что для длины волны лазерного излучения $10,6 \text{ мкм}$ кварцевое стекло не прозрачно и данное излучение поглощается в тонком слое ($\sim 10\text{--}50 \text{ мкм}$). Во-вторых, при высокой плотности мощности излучения (более 1 кВт/см^2) происходит высокоинтенсивное испарение с образованием нанокompозитов [10–13].

Целью данной работы являются анализ процесса получения нанопорошков диоксида кремния на основе высокоинтенсивного испарения кварцевого стекла под воздействием излучения CO_2 -лазера ($10,6 \text{ мкм}$) и исследование продуктов этой реакции.

Методика получения кварцевых нанопорошков

Предметом исследования в данной работе является процесс испарения с поверхности кварцевого стекла под воздействием сфокусированного лазерного излучения. Для этой цели была создана экспериментальная установка с квазизамкнутым объемом зоны испарения. Схема этого процесса показана на рис. 1,а.

Для организации процесса испарения в данной установке используется CO_2 -лазер с мощностью 100 Вт . Общий вид лазерной установки показан на рис. 1,б. Реактор из алюминиевых сосудов собирал весь испаряющийся нанопорошок диоксида кремния без утечек в виде «хлопьев», которые в дальнейшем осаждались в сосуд для сбора порошка, состоящий из двух камер (одна — для зоны воздействия лазерного излучения с кварцевым стержнем, другая — для сбора порошка), лазерного излучателя (ИЛГН-704) с системой фокусировки (линзы из ZnSe), управляемой системы вращения и подачи кварцевого стержня. Использовались кварцевые стержни из стекла марки КИ, обладающие высокой химической чистотой.

Управление процессом испарения кварцевого стекла осуществлялось изменением трех параметров:

- 1) размер фокального пятна на поверхности кварцевого стержня от $0,5$ до 3 мм^2 ;
- 2) скорость вращения кварцевого стержня от 1 до 100 об/мин ;
- 3) скорость линейной подачи кварцевого стержня от 1 до 15 мм/мин .

Комбинация этих параметров позволила при плотности мощности излучения 1 кВт/см^2 получать нанопорошок с массовой скоростью

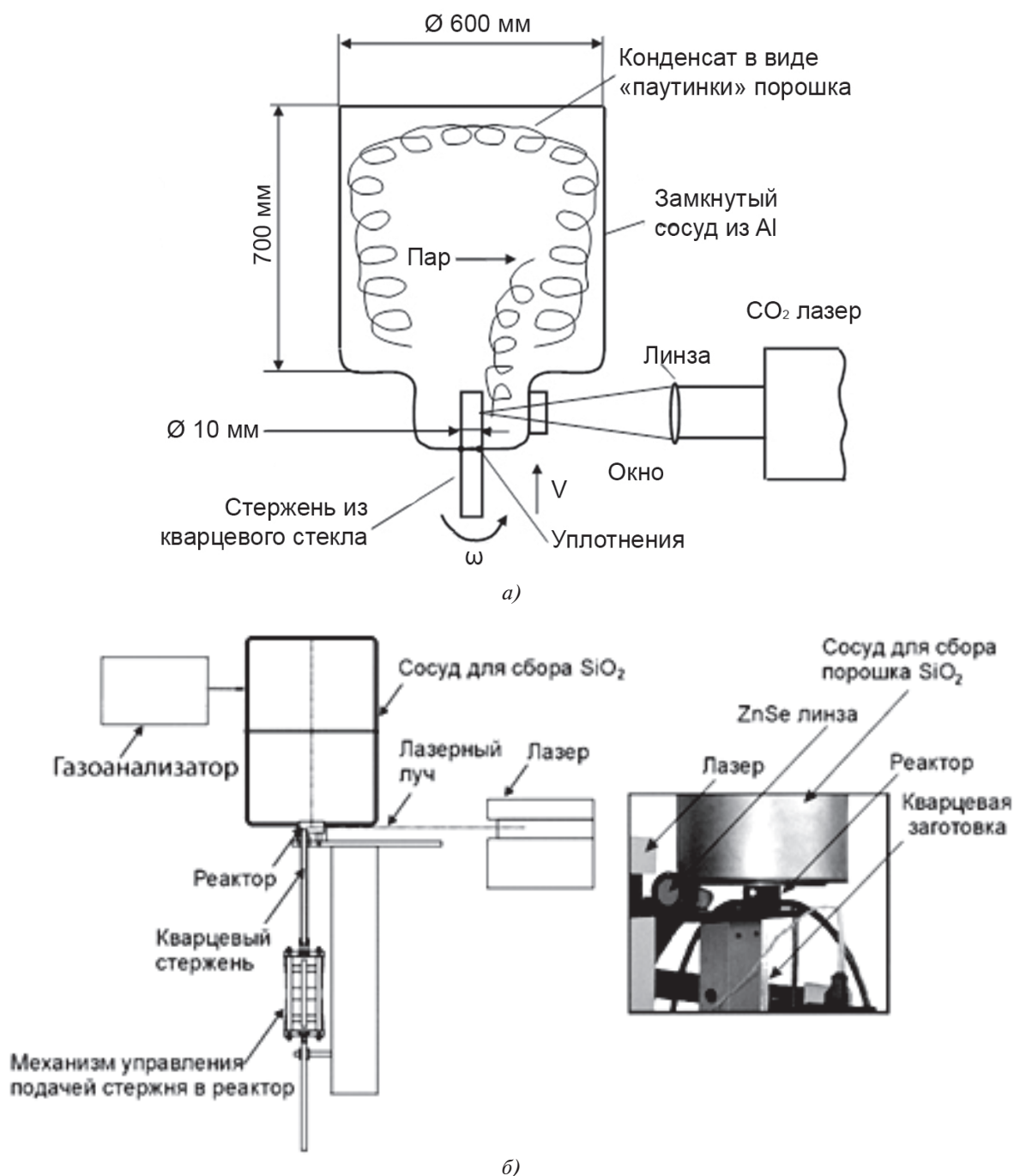


Рис. 1. Схема лазерной установки для получения кварцевого нанопорошка: а – схема процесса; б – конструкция установки [13]

20 мг/мин, а при плотности мощности излучения 10 кВт/см^2 – 200 мг/мин.

Таким образом, на данной экспериментальной установке можно получать десятки граммов высокочистого аморфного нанопорошка SiO_2 .

Теплофизический анализ процесса взаимодействия лазерного излучения с длиной волны $10,6 \text{ мкм}$ показывает, что процесс испарения кварцевого стержня происходит в тонком слое (50 мкм) и при высокой плотности мощности излучения (более 1 кВт/см^2). При этом, изменяя

плотность мощности падающего на поверхность лазерного излучения, можно осуществлять различные теплофизические процессы.

Лазерное излучение, поглотившись в тонком слое кварцевого стекла при высокой плотности мощности, нагревает его до высоких температур, что вызывает испарение его без образования жидкой фазы (возгонка). В процессе этого испарения поверхностного слоя стекла объем заготовки обладает низкой температурой (ниже температуры размягчения).

На рис. 2 показаны фотографии кварцевых стержней в процессе высокоинтенсивного испарения под воздействием лазерного излучения: видна струя испаряющегося кварцевого стекла (рис. 2,а), и после процесса обработки видны уменьшение диаметра кварцевого стержня и эрозионная поверхность обработки (рис. 2,б). Белая эрозионная обработка поверхность стекла обусловлена высокоинтенсивным процессом испарения.

Важно отметить, что кварцевое стекло испаряется в плазменном состоянии. Это косвенно подтверждается тем, что в замкнутом объеме реактора экспериментальной камеры образуется рыже-бурый неустойчивый газ NO_2 , возникновение которого возможно при ультрафиолетовом

окислении N_2 светящейся плазмой испаряемого кварцевого стекла.

Для измерения динамики концентрации NO_2 устанавливался газоанализатор, соединенный с камерой сбора кварцевого нанопорошка. В качестве газоанализаторов использовался оптико-электронный прибор для контроля диоксида азота.

Анализ возможности данной технологии получения нанопорошков диоксида кремния показывает, что производительность установки зависит от мощности лазерного излучения. При имеющейся мощности промышленных лазеров 5000 Вт можно получать минимум 1 кг нанопорошка в час.

Так как реактор состоял из большого объема алюминиевых сосудов и в нём отсутствовали воздушные потоки, сепарации наночастиц двуокиси кремния по размерам не происходило. Частицы осаждались на стенки сосудов в «цепочки» хлопьев, которые в последующем опадали на стенки сосуда.

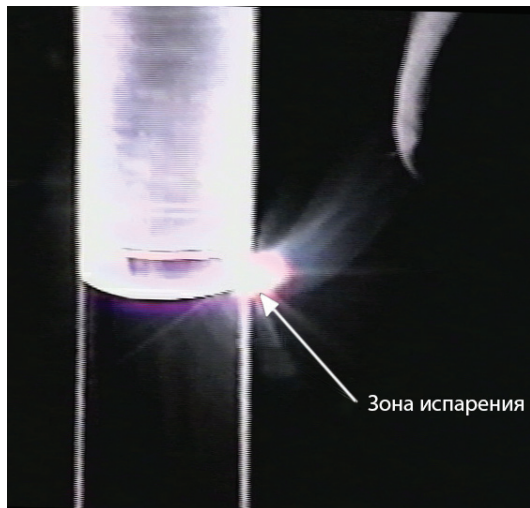
Данная камера представляет собой два отделения (см. рис. 1,б). Первое — сосуд диаметром 150 мм и высотой 100 мм, в котором было отверстие для подачи вращающегося кварцевого стержня. В боковой части этого сосуда было отверстие с окном из КСl для прохождения излучения CO_2 -лазера. Второе отделение — замкнутый сосуд диаметром 600 мм и высотой 700 мм с отверстием 150 мм. Этот сосуд устанавливается на первый сосуд и служит емкостью для сбора кварцевого нанопорошка.

В процессе получения кварцевых нанопорошков в зоне испарения материала под воздействием сфокусированного лазерного излучения образуется ярко светящаяся плазма, которая приводит к образованию газа NO_2 [14–16].

С помощью газоанализаторов различного класса, как оптических инфракрасных, так и электрохимических, было проведено исследование динамики образования и расхода этого газа.

50-литровый сосуд, в котором происходит образование и наполнение этого газа, был изолирован от окружающей среды с минимальными утечками.

Экспериментальные результаты образования и распада NO_2 показаны на рис. 3. Максимальная измеренная концентрация NO_2 показана на циклограмме (рис. 3,а) и не представляет экологической опасности. Экспериментальные результаты образования и распада NO_2 показаны на рис. 3,б.

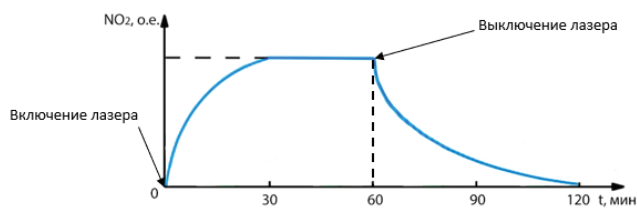


а)



б)

Рис. 2. Фотографии кварцевых заготовок: а — в процессе взаимодействия с лазерным излучением; б — после взаимодействия



а)



б)

Рис. 3. Образование NO_2 в процессе испарения кварцевого стекла под действием сфокусированного лазерного излучения: а — циклограмма образования и распада NO_2 ; б — реактор с порошками SiO_2 и желто-бурым газом NO_2

Исследование свойств полученного кварцевого нанопорошка

Технология получения, свойства и применение высокодисперсных порошков диоксида кремния, полученные газозольными методами, описаны в монографии [17].

Для многих применений кварцевых нанопорошков необходима высокая химическая чистота, однако в промышленных нанопорошках SiO_2 содержатся большие концентрации примесей ионов Cl^- и OH^- . Такие порошки содержат также большое количество кристаллитов и имеют большой разброс в размерах частиц, что в ряде случаев затрудняет их успешное применение. Поэтому представляет интерес исследование не только процесса получения нанопорошков диоксида кремния путем испарения кварцевого стекла при воздействии излучения CO_2 -лазера, но и его физико-химических свойств. Ранее были исследованы размеры, фазовый состав, удельная поверхность, оптические свойства. Эти исследования детально опубликованы в работах [11, 13].

Наиболее важны следующие результаты:

— кварцевые нанопорошки — это аморфные материалы (отсутствуют кристаллиты сферической формы);

— распределение размеров молекул находится в диапазоне 40—100 нм и имеет максимум при 80 нм;

— аморфность нанопорошков подтверждается рентгеновскими измерениями;

— инфракрасные спектральные измерения показали химическую чистоту кварцевых нанопорошков.

Частично данные измерения представлены на рис. 4. Получены фотографии с электронного микроскопа и гистограммы распределения размеров наночастиц SiO_2 . Наибольшее количество частиц имело сферическую форму с диаметром 80 нм (эти размеры подтверждаются различными методами).

На микрофотографии рис. 4,а видно, что форма частиц порошка, полученного данным способом, сферическая. Это свидетельствует о жидкокапельном механизме испарения, и связано с тем, что основной нагрев инфракрасным лазерным излучением идет в приповерхностном слое расплава, на глубине не более 50 мкм. Проведенный анализ процесса высокоинтенсивного испарения показывает, что испаряются сложные жидкостно-газовые (паровые) кластеры с минимальными размерами 10 нм, с сохранением ближних межмолекулярных связей, которые в процессе испарения и последующего охлаждения приобретают сферическую форму из-за поверхностного натяжения.

Важную роль в получении нанопорошка SiO_2 играет геометрия расположения трех компонентов этого процесса:

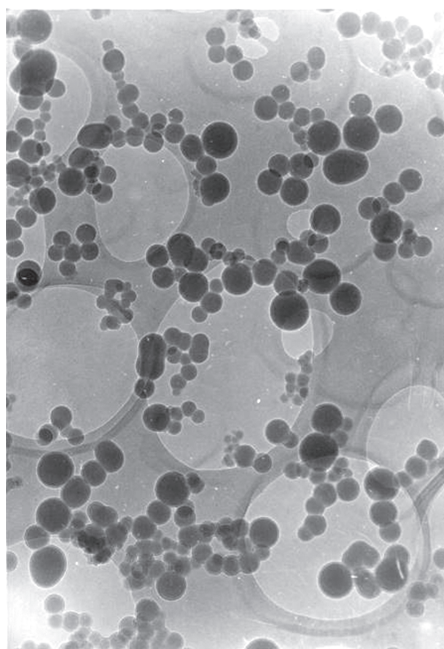
— направление струи испарения материала с поверхности кварцевого стержня;

— направление сфокусированного лазерного излучения на кварцевый стержень;

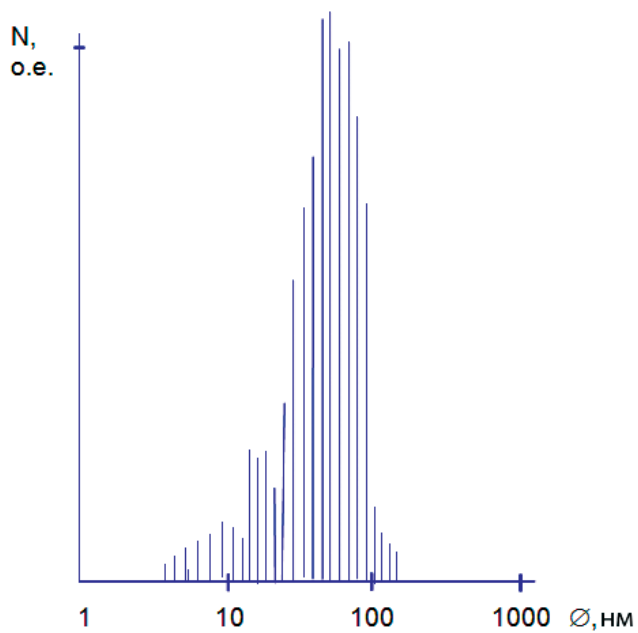
— скорость вращения и вертикального движения кварцевого стержня.

При рационально выбранных параметрах этих компонентов полученный нанопорошок представляет собой набор свободных сферических частиц, гистограмма которых показана на рис. 4,б. В случае, когда струя испаряющего пара кварца попадает в зону излучения, происходит «сварка» в сложные агломераты. Разброс размеров таких агломератов-наноконструкций показан на рис. 4,в.

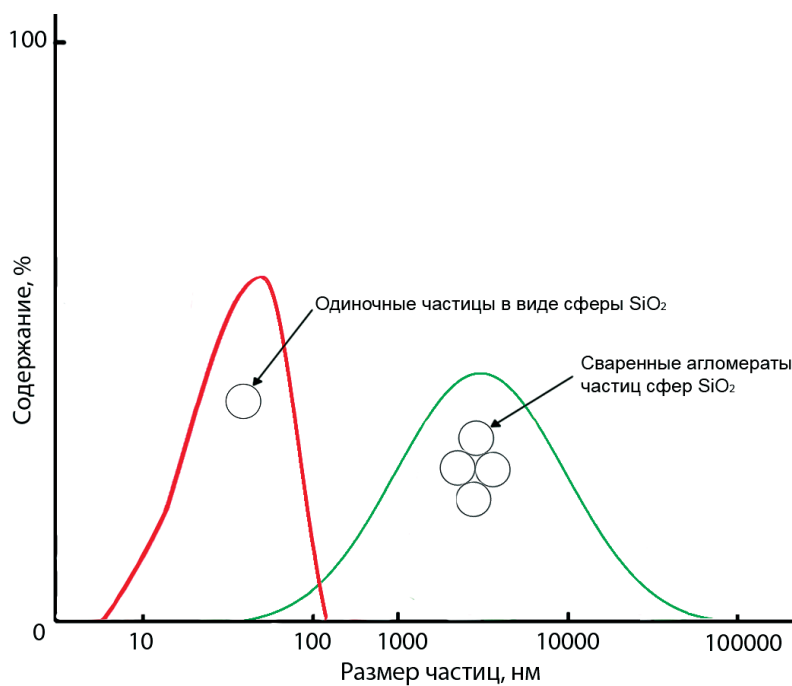
Общий вид полученного нанопорошка показан на рис. 4,г.



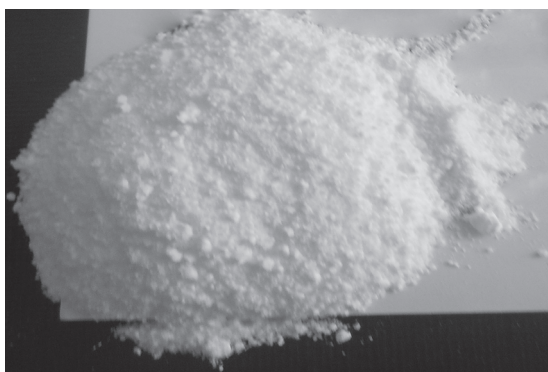
а)



б)



в)



з)

Рис. 4. Размерные параметры нанопорошка SiO_2 :
 а – микрофотография; б – гистограмма размеров;
 в – агломераты; з – фото полученного порошка SiO_2

Выводы

Показано, что с помощью взаимодействия на кварцевые стержни высокомоощным излучением CO₂-лазера можно получать рентгеноаморфные нанопорошки SiO₂ сферической формы.

Химический состав порошков диоксида кремния соответствует химическому составу исходного сырья, а в отличие от промышленных марок порошков диоксида кремния в них отсутствует хлор и фтор.

Проведенный анализ возможного использования данных нанопорошков диоксида кремния, показал, что основные области его применения основаны на следующих свойствах:

- высокая химическая чистота;
- монодисперсность;
- сферическая форма частиц.

Области применения полученных рассматриваемым методом нанопорошков диоксида кремния следующие:

- абразивный материал для полировки полупроводниковых пластин;
- абсорбент для очистки различных химических средств;
- добавка для создания композитных материалов [18–22];

Данный порошок использовался для моделирования спекания солнечным излучением лунного грунта [23].

Список источников

1. *Kushwaha A.K., John M., Misra M., Menezes P.L.* Nanocrystalline Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications // Crystals. 2021. Vol. 11, p. 1317. DOI: 10.3390/cryst11111317
2. Обзор рынка диоксида кремния (белая сажа и аэросил) в России и СНГ. — 7 изд. — М.: Инфо-лайн, 2021. — 112 с.
3. *Rahman I., Padavettan V.* Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: size-dependent properties, surface modification, and application in silica-polymer nanocomposites — a review // Journal of Nanomaterials. 2012. Vol. 2012, p.15. DOI: 10.1155/2012/132424
4. Брошюра компании Evonik, <https://products.evonik.com/assets/46/56/244656.pdf>
5. AEROSIL fumed silica - Product overview, <https://products.evonik.com/assets/46/24/244624.pdf>
6. Экокремний, <https://ekokremniy.ru/>
7. *Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К.* и др. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 320-323.
8. *Соковкин С.Ю., Ильвес В.Г.* Применение импульсного пучка для получения нанопорошков оксидных металлов. - Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. — 319 с.
9. *Леко В.К., Мазурин О.В.* Свойства кварцевого стекла. — Л.: Наука, 1985. — 165 с.
10. *Мачулка Г.А.* Лазерная обработка стекла. — М.: Советское радио, 1979. — 136 с.
11. *Сысоев В.К., Масычев В.И., Папченко Б.П.* и др. Высокоинтенсивное испарение кварцевого стекла с использованием инфракрасного лазерного излучения // Неорганические материалы. 2003. Т. 39. № 5. С. 634-640.
12. *Дианов Е.М., Лаврищев С.В., Марченко В.М.* и др. Синтез нанокompозита SiO₂: Cu_n⁰ методом лазерной дистилляции // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 12. С. 1105–1110.
13. *Сысоев В.К., Русанов С.Я.* Обработка кварцевого стекла излучением CO₂-лазера. — Дюссельдорф: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2012. — 192 с.
14. *Аскарьян Г.А., Батанов Г.М., Грицинин С.И.* и др. Плазмохимические процессы, сопровождающие разряд в воздухе, возбуждаемый СВЧ волновым пучком // Журнал технической физики. 1990. Т. 60. № 11. С. 77-84.
15. *Антонов А.С., Ишанин Г.Г.* Оптико-электронный газоанализатор для контроля диоксида азота // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 1. С. 61-64.
16. Газоанализаторы азота, <https://www.moslabo.ru/>
17. *Айлер Р.К.* Химия кремнезема: растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства, биохимия: В 2 ч. / Пер. с англ. Л.Т. Журавлева; Под ред. В.П. Прянишникова. — М.: Мир, 1982. — (416 + 712) с.
18. *Patel K.K., Purohit R.* Dispersion of SiO₂ Nano Particles on Epoxy Based Polymer Nano Composites and its Characterization // Oriental Journal of Chemistry. 2018. Vol. 34. No. 6. DOI: 10.13005/ojc/340641
19. *Fukubayashi Y., Yoga S.* Porous Polyimide-Silica Composite: A New Thermal Resistant Flexible Material // Materials Research Society Online Proceedings Library. 2014, p. 1645. DOI: 10.1557/opl.2014.278
20. *Ponyrko S., Kovářová J., Kobera L., Matějka L.* High-T-g, heat resistant epoxy-silica hybrids with a low content of silica generated by nonaqueous sol-gel process // Journal of Applied Polymer Science. 2014. Vol. 131. No. 20: 40899. DOI: 10.1002/app.40899
21. *Покровский А.М., Чермошенцева А.С.* Экспериментальное исследование влияния нанодобавок на свойства композиционных материалов с межслойными дефектами // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 212-221.
22. *Бычков А.Н., Фетисов Г.П., Кыдралиева К.А., Соколов Е.А., Джардималиева Г.И.* Нанокompозици-

онные материалы на основе металлосодержащих наночастиц и термопластичных полимерных матриц: получение и свойства // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 209-222.

References

1. Kushwaha A.K., John M., Misra M., Menezes P.L. Nanocrystalline Materials: Synthesis, Characterization, Properties, and Applications. *Crystals*, 2021, vol. 11, p. 1317. DOI: 10.3390/cryst11111317
2. *Obzor rynka dioksida kremniya (belaya sazha i aerosil) v Rossii i SNG* (Silicon dioxide market overview (white soot and aerosil) in Russia and the CIS), 7th edition, Moscow, Infomain, 2021, 112 p.
3. Rahman I., Padavettan V. Synthesis of silica nanoparticles by sol-gel: size-dependent properties, surface modification, and application in silica-polymer nanocomposites – a review. *Journal of Nanomaterials*, 2012, vol. 2012, p.15. DOI: 10.1155/2012/132424
4. *Evonik Brochure*, <https://products.evonik.com/assets/46/56/244656.pdf>
5. *AEROSIL® fumed silica - Product overview*, <https://products.evonik.com/assets/46/24/244624.pdf>
6. *Ekokremnii*, <https://ekokremniy.ru/>
7. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K. et al. *Doklady Akademii nauk*, 2006, vol. 409, no. 3, pp. 320-323.
8. Sokovkin S.Yu., Il'ves V.G. *Primenenie impul'snogo puchka dlya polucheniya nanoporoshkov oksidnykh metallov* (Pulsed beam application for oxide metals nano-powders obtaining), Ekaterinburg, RIO UrO RAN, 2012, 319 p.
9. Leko V.K., Mazurin O.V. *Svoistva kvartseвого стекла* (Quartz glass properties), Leningrad, Nauka, 1985, 165 p.
10. Machulka G.A. *Lazernaya obrabotka stekla* (Glass Laser Processing), Moscow, Sovetskoe Radio, 1979, 136 p.
11. Sysoev V.K., Masychev V.I., Papchenko B.P. et al. *Neorganicheskie materialy*, 2003, vol. 39, no. 5, pp. 634-640.
12. Dianov E.M., Lavrishchev S.V., Marchenko V.M. et al. Synthesis of the SiO₂: Cu_n⁰ nanocomposite by the laser distillation method. *Quantum Electronics*, 1996, vol. 26, no. 12, pp. 1075–1080. DOI: 10.1070/QE1996v026n12ABEH000877
13. Sysoev V.K., Rusanov S.Ya. *Obrabotka kvartseвого стекла izlucheniem CO₂ lazera* (Quartz glass processing by CO₂ laser radiation), Dusseldorf, LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2012, 192 p.
14. Askar'yan G.A., Batanov G.M., Gritsinin S.I. et al. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1990, vol. 60, no. 11, pp. 77-84.
15. Antonov A.S., Ishanin G.G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 61-64.
16. *Gazoanalizatory azota*, <https://www.moslabo.ru/>
17. Iler R.K. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties and Biochemistry*. John Wiley and Sons Ltd., New York, 1979, 896 p.
18. Patel K.K., Purohit R. Dispersion of SiO₂ Nano Particles on Epoxy Based Polymer Nano Composites and its Characterization. *Oriental Journal of Chemistry*, 2018, vol. 34, no. 6. DOI: 10.13005/ojc/340641
19. Fukubayashi Y., Yoga S. Porous Polyimide-Silica Composite: A New Thermal Resistant Flexible Material. *Materials Research Society Online Proceedings Library*, 2014, p. 1645. DOI: 10.1557/opl.2014.278
20. Ponyrko S., Kovářová J., Kobera L., Matějka L. High-T-g, heat resistant epoxy-silica hybrids with a low content of silica generated by nonaqueous sol-gel process. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, vol. 131, no. 20: 40899. DOI: 10.1002/app.40899
21. Pokrovskii A.M., Chermoshentseva A.S. Experimental study of nano-additives effect on properties of composite materials with interlayer defects. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 212-221.
22. Bychkov A.N., Fetisov G.P., Kydralievа K.A., Sokolov E.A., Dzhardimalieva G.I. Nanocomposite materials based on metallic nanoparticles and thermoplastic polymer matrices: production and properties. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 209-222.
23. Bagrov A.V., Sysoev A.K., Sysoev V.K., Yudin A.D. Modeling of sintering of moon soil imitators by solar radiation. *Letters on Materials*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 130-132. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-130-132

Статья поступила в редакцию 25.02.2022; одобрена после рецензирования 09.03.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted on 25.02.2022; approved after reviewing on 09.03.2022; accepted for publication on 21.03.2022.