

# ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Борис Семенович ЕЗДИН<sup>1</sup>  
Валерий Владимирович КАЛЯДА<sup>2</sup>  
Сергей Александрович ВАСИЛЬЕВ<sup>3</sup>  
Фарид Канафеович ШАБИЕВ<sup>4</sup>  
Юрий Вавилович ПАХАРУКОВ<sup>5</sup>  
Руслан Фаридович САФАРГАЛИЕВ<sup>6</sup>

УДК 533.24, 54.057

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ПИРОЛИЗА МОНОСИЛАНА В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ СЖАТИЯ\*

<sup>1</sup> кандидат физико-математических наук, доцент, Отдел прикладной физики, Физический факультет, Новосибирский государственный университет  
bse@nsu.ru; ORCID: 0000-0003-4563-9265

<sup>2</sup> ведущий электроник, Отдел прикладной физики, Физический факультет, Новосибирский государственный университет  
v.kalyada@nsu.ru; ORCID: 0000-0003-2739-5017

<sup>3</sup> ведущий инженер, Отдел прикладной физики, Физический факультет, Новосибирский государственный университет  
svasiljev@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0076-9445

<sup>4</sup> кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра прикладной и технической физики, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет  
faridshab@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0551-3836

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSUS-2020-0039). Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Прикладная физика» НГУ. Измерения проведены на оборудовании ЦКП «Высокие технологии и аналитика наносистем», отдела АТИЦ «Высокие технологии и наноструктурированные материалы» Физического факультета НГУ.

<sup>5</sup> доктор физико-математических наук, профессор,  
кафедра прикладной и технической физики,  
Физико-технический институт, Тюменский государственный университет  
pacharukovyu@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3937-4937

<sup>6</sup> ассистент, Тюменский индустриальный университет  
ruslan.safargaliev@mail.ru; ORCID: 0000-0002-4799-8651

**Цитирование:** Ездин Б. С. Исследование термодинамических условий для пиролиза моносилана в циклическом реакторе сжатия / Б. С. Ездин, В. В. Каляда, С. А. Васильев, Ф. К. Шабиев, Ю. В. Пахаруков, Р. Ф. Сафаргалиев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 4 (32). С. 8-20.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-8-20

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования структуры наночастиц кремния, полученных пиролизом моносилана в условиях адиабатического сжатия в циклическом химическом реакторе в атмосфере аргона. Для создания термодинамических условий, необходимых для пиролиза моносилана, применяется циклический реактор сжатия. Реактор представляет собой тепловую машину, позволяющую получать высокие давления и температуру в сжимаемых газах. Показано, что для содержания моносилана в буферном газе не более 20% полный пиролиз происходит в диапазоне пиковых давлений выше 2,5 МПа. Разложение моносилана на кремний и водород сопровождается синтезом кремниевых наночастиц. Просвечивающая электронная микроскопия показала, что наночастицы имеют в основном сферическую форму с размерами от 10 до 150 нм. Максимум размеров частиц приходится на 50-60 нм. Размеры частиц подчиняются логнормальному распределению, что свидетельствует в пользу механизма роста за счет слияния частиц более мелких размеров. Для исследования структурных особенностей частиц использовался метод рентгенофазового анализа. Область когерентного рассеяния частиц составила 4-20 нм.

### Ключевые слова

Пиролиз, наноразмерные порошки, адиабатическое сжатие, моносилан, кремний.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-8-20

### Введение

Интерес к порошкам с размерами частиц несколько нанометров (нанопорошкам), к изучению их свойств, к методам их получения обуславливается потенциальными и уже имеющимися применениями этих порошков в различных технологиях как производства новых материалов с задаваемыми наперед свойствами, так и модификации поверхностей существующих материалов.

Нанопорошки кремния интересны своими свойствами в области фотолуминесценции [4], т. е. возможностью использования их в качестве люминофоров для преобразования излучения ультрафиолетового диапазона в видимый свет, электролюминесценции [2] — возможностью излучать свет видимого диапазона при пропускании электрического тока. Эти свойства нанопорошков могут быть использованы для миниатюризации устройств передачи данных — светоизлучающих диодов, фотоприемников, световодов — и для их применения в устройствах обработки сигналов — интегральных микросхемах. Широкое применение нанопорошки кремния получили в технологиях изготовления сенсорных элементов для химических, биологических датчиков, работа которых обусловлена изменением физических свойств в случае появления маркера в контролируемой среде [10].

Для получения нанопорошков кремния используются плазмохимический синтез, анодное электрохимическое травление, химико-термическая обработка [1, 3, 5]. В качестве сырья используются диоксид и монооксид кремния. Дорогостоящее уникальное оборудование, трудность масштабирования, малая производительность существенно увеличивают себестоимость порошков и являются недостатками этих методов. Имеет место значительный разброс наночастиц по размерам (от единиц до сотен нанометров) и высокое содержание примесей в получаемом продукте. Сложным моментом этих подходов является контроль и влияние исходных параметров на полидисперсность и морфологию получаемых порошков.

Другой широко используемой техникой получения наноразмерного кремния является термическое разложение газа моносилана на кремний и водород, что возможно осуществить несколькими способами: продувкой газовой смеси моносилана и аргона через горячий (1 000 °С) трубчатый реактор [12], с помощью газоразрядной плазмы [3, 5], лазерно-индуцированным методом [11]. К минусам этих способов относятся высокая энергоемкость, большая полидисперсность получаемых порошков вследствие неоднородности условий в реакторном объеме, а также, как было указано выше, высокая себестоимость полученного продукта. В работе [6] предложен способ получения наноразмерного кремния термическим разложением моносилана при нагревании его сжатием в адиабатическом процессе. Предложенный метод не является непрерывным, и поэтому его применение не представляется возможным для промышленной выработки нанопорошков.

### Материалы и методы

В настоящей работе используется метод сжатия исходного сырья в газовой фазе в объеме циклического реактора сжатия. Пиролиз исходных продуктов и последующий синтез происходят в реакторном объеме в циклах сжатия-разрежения пары «поршень — цилиндр». Метод обеспечивает однородность условий и высокую температуру протекания реакции во всем реакторном объеме. После завершения рабочего цикла сжатия-разрежения и отбора полученного порошка получается готовый продукт, не требующий дальнейшего технологического передела.

Используемый химический реактор сжатия (рис. 1) достаточно полно описан в работе [9]. Сжатие реактивов происходит внутри цилиндра поршнем,

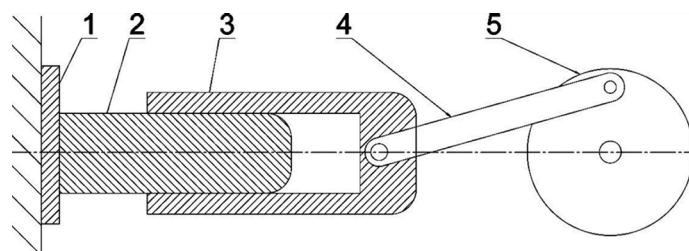


Рис. 1. Схема химического реактора сжатия: 1 — тензодатчик, 2 — поршень, 3 — цилиндр, 4 — шатун, 5 — маховик электродвигателя

Fig. 1. Scheme of a chemical compression reactor: 1 — strain gauge, 2 — piston, 3 — cylinder, 4 — connecting rod, 5 — electric motor flywheel

поверхности которых посредством термоэлектрохимического окислирования [7] покрыты защитным керамическим слоем на основе оксида алюминия. Покрытие выдерживает многократное термоциклирование, обеспечивая при этом малое трение. Коэффициент трения близок к 0,01, что позволяет минимизировать зазор между трущимися поверхностями. Поэтому для работы пары «поршень — цилиндр» не требуется смазка, а следовательно, не вносятся загрязнения и дополнительные химические примеси в реакторный объем.

В эксперименте в качестве химических реагентов использовалась смесь газов, моносилана и аргона. Аргон применялся для увеличения показателя адиабаты смеси. Сжатие смеси происходило с частотой, близкой к 10 Гц. Полученный продукт накапливался в дополнительной емкости системы сбора продуктов и исследовался методами рентгеновской дифрактометрии и методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР).

Прохождение реакции пиролиза моносилана  $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$  контролировалось в режиме online универсальным газовым анализатором UGA-200 (Stanford Research Systems, США). Появление большего количества водорода указывало на прохождение реакции пиролиза, а исчезновение или малое количество исходных реагентов ( $\text{SiH}_4$ ) — на полноту прохождения реакции переработки.

В таблице 1 приведены условия получения исследовавшихся образцов кремниевых наночастиц. Температура рассчитывалась по максимальному давлению в адиабатическом приближении с усредненным показателем адиабаты  $\gamma = 1,61$ .

Таблица 1

Условия пиролиза моносилана в циклическом реакторе сжатия

Table 1

Conditions for the pyrolysis of monosilane in a cyclic compression reactor

Образец	Содержание $\text{SiH}_4$ в смеси с аргоном, %	Максимальное давление, МПа	Расчетная максимальная температура, К
1	18	2,5	780
2	18	3	830

### Результаты и обсуждения

Исследование полученных образцов методом ПЭМВР проводилось на электронном микроскопе JEM-2010 (JEOL, Япония) с ускоряющим напряжением 200 кВ и разрешающей способностью 0,14 нм. Частицы наносили диспергированием взвеси образца в спирте на медную подложку с использованием ультразвукового диспергатора. Локальный анализ элементного состава образцов проводили с использованием энергодисперсионного спектрометра QUANTAX 200-TEM (Bruker, Германия) с XFlash-детектором и разрешением по энергии порядка 130 эВ. Цифровую обработку полученных электронно-микроскопических изображений с расчетом наблюдаемых межплоскостных расстояний по Фурье-анализу области проводили в программе DigitalMicrograph (Gatan, США). На рис. 2 показаны SEM-изображения образцов 1 и 2.

Изображения, представленные на рис. 2, были проанализированы на предмет распределения частиц по размерам. На рис. 3 представлены соответствующие гистограммы.

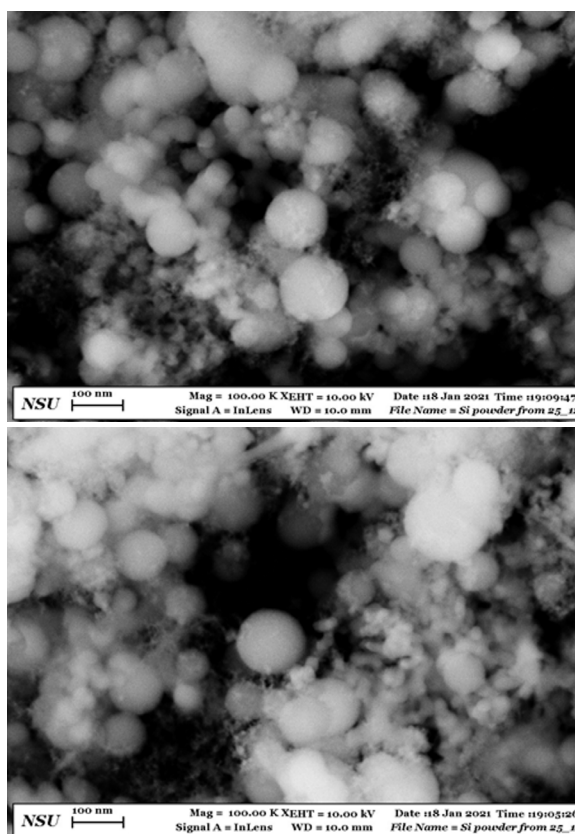


Рис. 2. SEM-изображения частиц нанопорошков кремния: сверху — образец 1, снизу — образец 2

Fig. 2. SEM-images of particles of silicon nanopowders: above — sample 1, below — sample 2

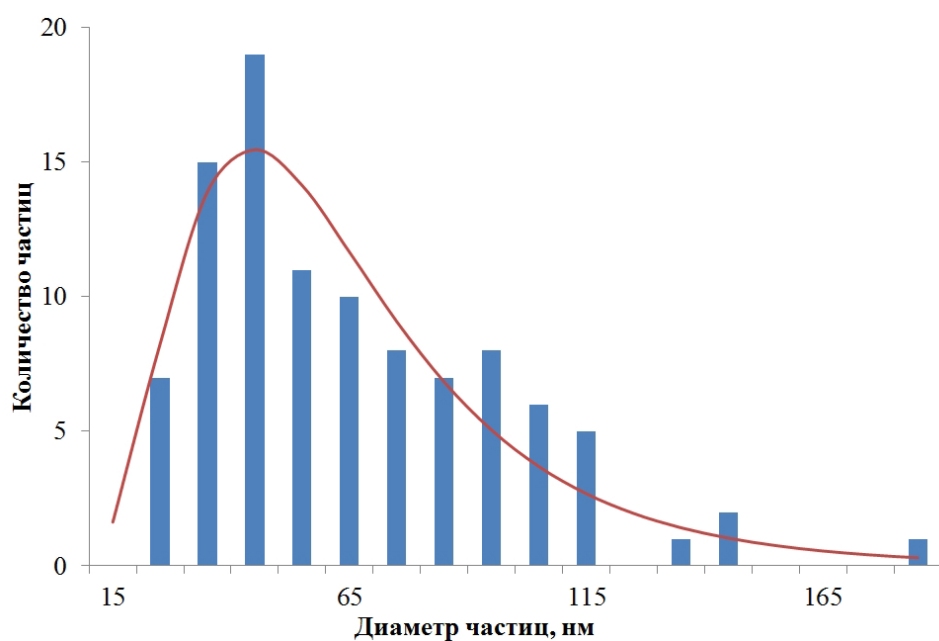
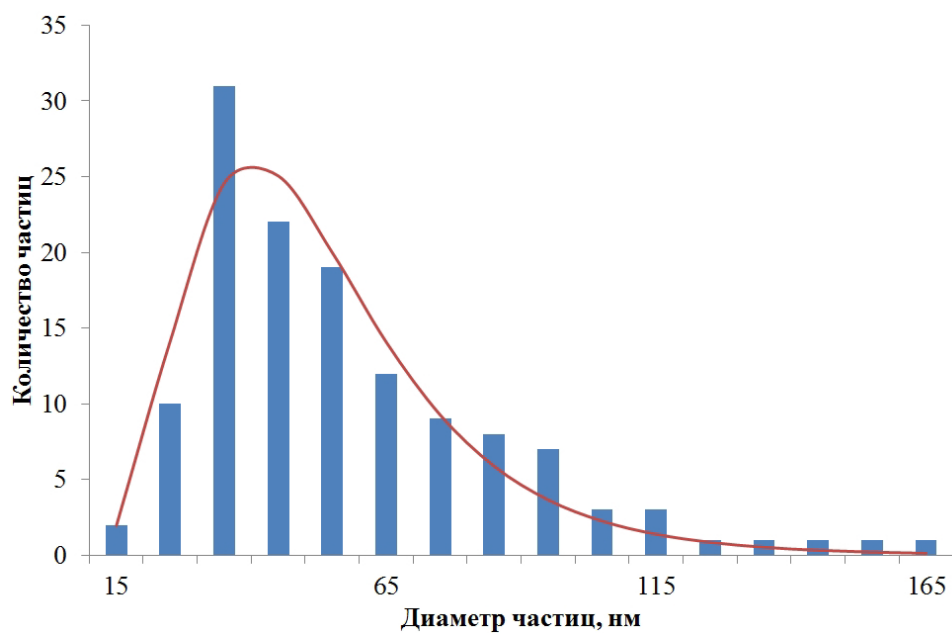


Рис. 3. Гистограммы распределения наночастиц кремния по размерам: сверху — образец 1, снизу — образец 2. Красными линиями показаны аппроксимирующие логнормальные распределения

Fig. 3. Size distribution histograms of silicon nanoparticles: above — sample 1, below — sample 2. The red lines show the approximating lognormal distributions



Распределения аппроксимировались логнормальным законом:

$$f(x) \sim \frac{1}{x\sigma} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \ln \mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Для образца 1:  $\mu = 48,6$  и  $\sigma = 0,43$ . Для образца 2:  $\mu = 57,4$  и  $\sigma = 0,51$ . Стандартное отклонение для образцов 1 и 2 составило 5,6 и 9,4 соответственно. Логнормальное распределение указывает на то, что на рост частиц оказывают влияние не только термодинамические случайные факторы, но и частицы меньших размеров, что свидетельствует в пользу механизма роста наночастиц путем слияния более мелких частиц.

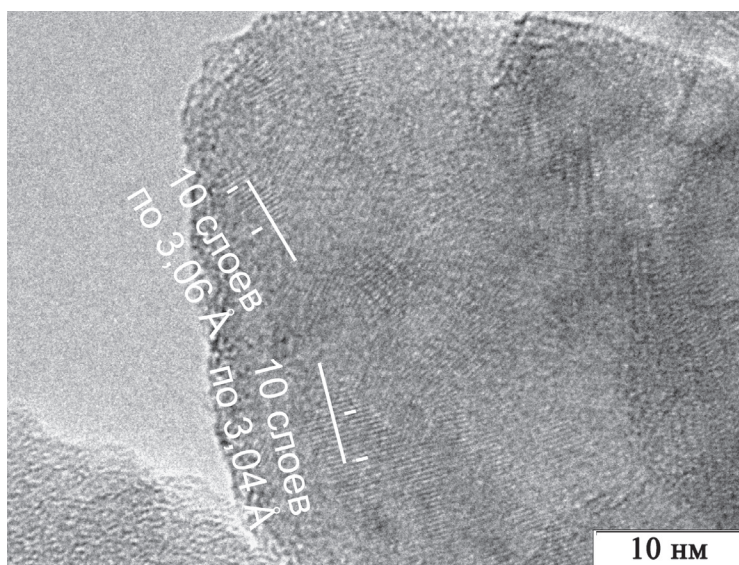
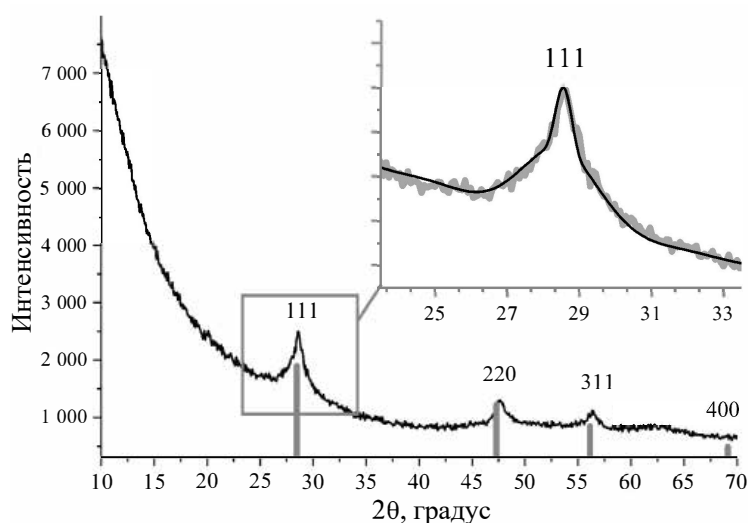


Рис. 4. Изображение частиц образца 1, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения

Fig. 4. Image of sample particles 1 obtained by high-resolution transmission electron microscopy

Из рис. 4 видно, что межплоскостные расстояния 3,04 и 3,06 Å соответствуют направлению 111 для структуры кремния.

Для рентгенофазового анализа использовался порошковый рентгеновский дифрактометр D8 Advance (вертикальный гониометр  $\theta/2\theta$ -геометрии) (Bruker, Германия). Прибор оснащен линейным полупроводниковым энергодисперсионным детектором Lynx-Eye. Источником излучения являлась рентгеновская трубка с медным анодом. Средняя длина волны излучения  $\text{CuK}\alpha = 0,154184$  нм ( $\text{CuK}\alpha_1 = 0,15406$  нм,  $\text{CuK}\alpha_2 = 0,154439$  нм), ток генератора — 35 мА, напряжение — 35 кВ. Диапазон съемки —  $10-70^\circ$  по  $2\theta$ , шаг —  $0,075^\circ$ , время накопления в точке — 4 сек.



*Рис. 5.* Дифракционные данные для образца 1, штрих-диаграмма — фаза кремния (PDF 00-027-1402). На вставке представлены модельные расчеты для сферических кристаллитов размерами 4-20 нм

*Fig. 5.* Diffraction data for sample 1, bar cart — silicon phase (PDF 00-027-1402). The inset shows model calculations for spherical crystallites 4-20 nm in size

На рис. 5 представлена дифракционная картина для образца 1. Штрих-диаграммой показан кремний из базы данных PDF (карточка 00-027-1402).

Видно, что образец является однофазным, наблюдаются пики только кристаллического кремния. Других фаз, соответствующих материалу камеры или покрытию поршня, не обнаружено. У дифракционных пиков наблюдается характерная форма: узкий носик и широкое основание (наиболее выражено для рефлекса 111). Модельные расчеты показали, что пик 111 наилучшим образом описывается сферическими кристаллитами с распределением по диаметрам 4-20 нм.

## Выводы

Показано, что в реакторе циклического сжатия в атмосфере аргона обеспечиваются термодинамические условия, достаточные для полного разложения моносилана до водорода и кремния при давлениях выше 2,5 МПа, что соответствует температуре в зоне реакций 780 К и выше. Частота циклов сжатия-разрежения 10 Гц обеспечивает необходимые времена как для пиролиза моносилана, так и для синтеза кремниевых наночастиц размером 10-150 нм. Логнормальность распределения частиц по размерам указывает на механизм образования более крупных наночастиц в результате слияния более мелких.

Показано, что метод пиролиза моносилана в присутствии аргона путем циклического сжатия в проточном реакторе позволяет получать порошки наночастиц Si высокой степени чистоты. Получаемый продукт химически чистый



и определяется только степенью очистки исходных реагентов. Технологические процессы не вносят в состав продукта дополнительных загрязнений. Получаемый продукт не требует дальнейшей обработки, например химического травления, как в большинстве предлагаемых методов, и его можно использовать для получения материалов с заданными наперед функциональными свойствами, в том числе для модификации структуры и свойств металлов и сплавов [3, 8].

В работе были определены оптимальные режимы работы химического реактора пиролиза моносилаана для получения наноразмерного Si с размерами кристаллитов 4-20 нм. Достигнута высокая повторяемость по составу и размерам синтезируемого продукта в зависимости от основных входных параметров — химического состава смеси, давления в реакторной зоне и т. д. Показано, что предложенный метод обеспечивает высокую степень переработки исходных реагентов.

Предлагаемый метод получения наноразмерного кремния удобен для технологического исполнения в промышленном производстве высокочистого нанопорошка кремния.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аньшаков А. С. Синтез нанопорошков карбида кремния в двухструйном плазмохимическом реакторе / А. С. Аньшаков, Э. К. Урбах, А. Э. Урбах, В. А. Фалеев, В. С. Чередниченко // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Том 24. № 3 (105). С. 473-482.
2. Вандышев Е. Н. Фотолюминесценция кремниевых нанокристаллов под действием электрического поля / Е. Н. Вандышев, А. М. Гилинский, Т. С. Шамирзаев, К. С. Журавлев // Физика и техника полупроводников. 2005. Том 39. № 11. С. 1365-1369.
3. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. М.: Физматлит, 2005. 410 с.
4. Ефремов М. Д. Видимая фотолюминесценция нанопорошков кремния, созданных испарением кремния мощным электронным пучком / М. Д. Ефремов, В. А. Володин, Д. В. Марин, С. А. Аржанникова, С. В. Горяйнов, А. И. Корчагин, В. В. Черепков, А. В. Лаврухин, С. Н. Фадеев, Р. А. Салимов, С. П. Бардаханов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2004. Том 80. № 8. С. 619-622.
5. Ищенко А. А. Нанокремний: свойства, получение, применение, методы исследования и контроля / А. А. Ищенко, Г. В. Фетисов, Л. А. Асланов. М.: Физматлит, 2011. 647 с.
6. Поздняков Г. А. Получение наноразмерных порошков кремния разложением моносилаана в адиабатическом процессе / Г. А. Поздняков, В. Н. Яковлев, А. И. Сапрыкин // Доклады Академии наук. 2014. Том 456. № 1. С. 60-63. DOI: 10.7868/S0869565214130143
7. Способ микродугового оксидирования: пат. 2389830 Рос. Федерация: МПК С25D 11/02 / А. А. Никифоров. № 2008115739/02; заявл. 21.04.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

8. Черепанов А. Н. Модификация структуры и свойств никелевых сплавов наноструктурированными композиционными порошками / А. Н. Черепанов, В. Е. Овчаренко, Г. Лю, Л. Цао // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Том 22. № 1. С. 131-136.
9. Ezdin B. S. Fast cyclic compression installation for conversion of light hydrocarbons / B. S. Ezdin, A. E. Zarvin, A. S. Yaskin, V. V. Kalyada, S. A. Kononov // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 52. No. 1. Pp. 26-28. DOI: 10.1007/s10556-016-0141-5
10. Morales-Sánchez A. Topographic analysis of silicon nanoparticles-based electroluminescent devices / A. Morales-Sánchez, J. Barreto, C. Domínguez, M. Aceves, K. M. Leyva, J. A. Luna-López, J. Carrillo, J. Pedraza // Materials Science and Engineering: B. 2010. Vol. 174. No. 1-3. Pp. 123-126. DOI: 10.1016/j.mseb.2010.03.030
11. Vladimirov A. Synthesis of luminescent Si Nanoparticles using the laser-induced pyrolysis / A. Vladimirov, S. Korovin, A. Surkov, E. Kelm, V. Pustovoy // Laser Physics. 2011. Vol. 21. No. 4. Pp. 830-835. DOI: 10.1134/S1054660X11080032
12. Wiggers H. Silicon particle formation by pyrolysis of silane in a hot wall gasphase reactor / H. Wiggers, R. Starke, P. Roth // Chemical Engineering & Technology. 2001. Vol. 24. No. 3. Pp. 261-264. DOI: 10.1002/1521-4125(200103)24:3<261::AID-CEAT261>3.0.CO;2-K

**Boris S. YEZDIN<sup>1</sup>**  
**Valerii V. KALYADA<sup>2</sup>**  
**Sergey A. VASILIEV<sup>3</sup>**  
**Farid K. SHABIEV<sup>4</sup>**  
**Yuri V. PAKHARUKOV<sup>5</sup>**  
**Ruslan F. SAFARGALIEV<sup>6</sup>**

UDC 533.24, 54.057

## **RESEARCH ON THE THERMODYNAMIC CONDITIONS FOR THE PYROLYSIS OF MONOSILANE IN A CYCLIC COMPRESSION REACTOR\***

<sup>1</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Applied Physics Division,  
Department of Physics, Novosibirsk State University  
bse@nsu.ru; ORCID: 0000-0003-4563-9265

<sup>2</sup> Leading Electronics Engineer, Applied Physics Division,  
Department of Physics, Novosibirsk State University  
v.kalyada@nsu.ru; ORCID: 0000-0003-2739-5017

<sup>3</sup> Leading Engineer, Applied Physics Division,  
Department of Physics, Novosibirsk State University  
svasiljev@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0076-9445

<sup>4</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,  
Department of Applied and Technical Physics,  
Institute of Physics and Technology, University of Tyumen  
faridshab@mail.ru; ORCID: 0000-0003-0551-3836

<sup>5</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Applied and Technical Physics,  
Institute of Physics and Technology, University of Tyumen  
pacharukovyu@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-3937-4937

---

\* The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSUS-2020-0039). The studies were carried out on the equipment of the Center for Collective Use “Applied Physics” of Novosibirsk State University. The measurements were carried out on the equipment of the Center for Collective Use “High Technologies and Nanosystems Analytics” a department of the Analytical and Technological Research Center “High Technologies & Nanostructured Materials” of the Physics Department of Novosibirsk State University.

---

<sup>6</sup> Assistant, Tyumen Industrial University  
ruslan.safargaliev@mail.ru; ORCID: 0000-0002-4799-8651

---

**Citation:** Yezdin B. S., Kalyada V. V., Vasiliev S. A., Shabiev F. K., Pakharukov Yu. V., Safargaliev R. F. 2022. "Research on the thermodynamic conditions for the pyrolysis of monosilane in a cyclic compression reactor". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 4 (32), pp. 8-20.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-8-20

---

### Abstract

In this work the pyrolysis of monosilane under adiabatic compression conditions in an argon atmosphere is investigated. Cyclic compression reactor is used to create thermodynamic conditions required for monosilane pyrolysis. It is shown that for the monosilane content in the buffer gas not exceeding 20% the complete pyrolysis occurs in the peak pressure range above 2.5 MPa. The monosilane decomposition into silicon and hydrogen is accompanied by the synthesis of silicon nanoparticles sized 10-150 nm. The maximum size of the particles occurs at 50-60 nm. The particle sizes follow the lognormal distribution which points in favour of the growth mechanism due to the fusion of smaller particles.

### Keywords

Pyrolysis, nanosized powders, adiabatic compression, monosilane, silicon.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-8-20

### REFERENCES

1. Anshakov A. S., Urbakh E. K., Urbakh A. E., Faleev V. A., Cherednichenko V. S. 2017. "Synthesis of silicon carbide nanopowders in a two-jet plasma-chemical reactor". Thermophysics and Aeromechanics, vol. 24, no. 3, pp. 459-467.  
DOI: 10.1134/S0869864317030131
  2. Vandyshev E. N., Gilinskii A. M., Shamirzaev T. S., Zhuravlev K. S. 2005. "Photoluminescence of silicon nanocrystals under the effect of an electric field". Semiconductors, vol. 39, no. 11, pp. 1319-1322. DOI: 10.1134/1.2128458
  3. Gusev A. I. 2005. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit. 410 p. [In Russian]
  4. Efremov M. D., Volodin V. A., Marin D. V., Arzhannikova S. A., Goryainov S. V., Korchagin A. I., Cherepkov V. V., Lavrukhin A. V., Fadeev S. N., Salimov R. A., Bardakhanov S. P. 2004. "Visible photoluminescence from silicon nanopowders produced by silicon evaporation in a high-power electron beam". Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, vol. 80, no. 8, pp. 544-547.  
DOI: 10.1134/1.1846116
  5. Ishchenko A. A., Fetisov G. V., Aslanov L. A. 2011. Nanocremni: Properties, preparation, application, methods of research and control. Moscow: Fizmatlit. 647 p. [In Russian]
-

6. Pozdnyakov G. A., Yakovlev V. N., Saprykin A. I. 2014. "Production of nanosized silicon powders by monosilane decomposition in an adiabatic process". *Doklady Physical Chemistry*, vol. 456, no. 1, pp. 67-70. DOI: 10.1134/S0012501614050029
7. Nikiforov A. A. 2010. The method of microarc oxidation: Pat. 2389830 Russian Federation: MPCC25D11/02. No. 2008115739/02; declared 21 April 2008; published 20 May 2010; bull. no. 14. [In Russian]
8. Cherepanov A. N., Ovcharenko V. E., Liu G., Cao L. 2015. "Modifying structure and properties of nickel alloys by nanostructured composite powders". *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 22, no. 1, pp. 127-132. DOI: 10.1134/S0869864314010114
9. Ezzdin B. S., Zarvin A. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V., Kononov S. A. 2016. "Fast cyclic compression installation for conversion of light hydrocarbons". *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 52, no. 1, pp. 26-28. DOI: 10.1007/s10556-016-0141-5
10. Morales-Sánchez A., Barreto J., Domínguez C., Aceves M., Leyva K. M., Luna-López J. A., Carrillo J., Pedraza J. 2010. "Topographic analysis of silicon nanoparticles-based electroluminescent devices". *Materials Science and Engineering: B*, vol. 174, no. 1-3, pp. 123-126. DOI: 10.1016/j.mseb.2010.03.030
11. Vladimirov A., Korovin S., Surkov A., Kelm E., Pustovoy V. 2011. "Synthesis of luminescent Si Nanoparticles using the laser-induced pyrolysis". *Laser Physics*, vol. 21, no. 4, pp. 830-835. DOI: 10.1134/S1054660X11080032
12. Wiggers H., Starke R., Roth P. 2001. "Silicon particle formation by pyrolysis of silane in a hot wall gasphase reactor". *Chemical Engineering and Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 261-264. DOI: 10.1002/1521-4125(200103)24:3<261::AID-CEAT261>3.0.CO;2-K