2.6.6 *НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ*
NANOTECHNOLOGY AND NANOMATERIALS

DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-3-60-67
УДК: 544.463

Разработка метода получения керамических нанокомпозитов с использованием элементов золь-гель-технологии для создания вкраплений аморфных фаз с составом, аналогичным целевой кристаллической керамической матрице

Р.Х. Рахимов[1, a] ©, В.В. Паньков[2, b] ©, В.П. Ермаков[1, c] ©, Ю.С. Гайдук[2, d] ©, М.Р. Рахимов[1, e] ©, Д.Н. Мухторов[3, f] ©

[1] **Институт материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан**

[2] **Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь**

[3] **Ферганский политехнический институт, г. Фергана, Республика Узбекистан**

[a] **E-mail: rustam-shsul@yandex.com**

[b] **E-mail: pankovbsu@gmail.com**

[c] **E-mail: labimanod@uzsci.net**

[d] **E-mail: j_hajduk@bk.ru**

[e] **E-mail: rustam-shsul@yandex.com**

[f] **E-mail:dimajone0909@gmail.com**

Аннотация. Разработан метод получения керамических нанокомпозитов с использованием элементов золь-гель технологии для создания вкраплений аморфных фаз с составом, аналогичным целевой кристаллической керамической матрице, синтезированной на солнечной печи. Показано, при активации полученного материала импульсами, генерируемыми функциональной керамикой, свойства данного материала приближаются к свойствам прототипа. Использование данной разработки может привести к возможности производства пленочно-керамического композита в промышленных объемах и с низкой себестоимостью.

Ключевые слова: функциональная керамика, импульсное излучение, гель-золь-технология, механохимия, солнечная печь

Благодарности. Работа выполнена в рамках узбекско-белорусского совместного проекта «Разработка масштабируемых процессов получения композиционной импульсной нанокерамики дальнего ИК-диапазона».

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Рахимов Р.Х., Паньков В.В., Ермаков В.П., Гайдук Ю.С., Рахимов М.Р., Мухторов Д.Н. Разработка метода получения керамических нанокомпозитов с использованием элементов золь-гель технологии для создания вкраплений аморфных фаз с составом, аналогичным целевой кристаллической керамической матрице // Computational nanotechnology. 2022. Т. 9. № 3. С. 60–67. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-3-60-67

DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-3-60-67

Development of a Method for Obtaining Ceramic Nanocomposites Using Sol-gel Technology Elements to Create Inclusions of Amorphous Phases with a Composition Similar to the Target Crystalline Ceramic Matrix

R.Kh. Rakhimov[1, a] ©, V.V. Pankov[2, b] ©, V.P. Yermakov[1, c] ©, Yu.S. Haiduk[2, d] ©, M.R. Rakhimov[1, e] ©, D.N. Mukhtorov[3, f] ©

[1] **Institute of Materials Science of the SPA "Physics-Sun" of the Academy of Science of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan**

[2] **Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus**

[3] **Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Republic of Uzbekistan**

[a] **E-mail: rustam-shsul@yandex.com**

[b] **E-mail: pankovbsu@gmail.com**

[c] **E-mail: labimanod@uzsci.net**

[d] **E-mail: j_hajduk@bk.ru**

[e] **E-mail: rustam-shsul@yandex.com**

[f] **E-mail:dimajone0909@gmail.com**

Abstract. A method has been developed for obtaining ceramic nanocomposites using elements of sol-gel technology to create inclusions of amorphous phases with a composition similar to the target crystalline ceramic matrix synthesized in a solar furnace. It is shown that when the resulting material is activated by pulses generated by functional ceramics, the properties of this material approach those of the prototype. The use of this development can lead to the possibility of producing a film-ceramic composite in industrial volumes and at a low cost.

Key words: functional ceramics, pulsed radiation, gel-sol technology, mechanochemistry, solar furnace

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the Uzbek-Belarusian joint project "Development of scalable processes for obtaining composite pulsed far-IR nanoceramics".

FOR CITATION: Rakhimov R.Kh., Pankov V.V., Yermakov V.P., Haiduk Yu.S., Rakhimov M.R., Mukhtorov D.N. Development of a Method for Obtaining Ceramic Nanocomposites Using Sol-gel Technology Elements to Create Inclusions of Amorphous Phases with a Composition Similar to the Target Crystalline Ceramic Matrix. *Computational Nanotechnology*. 2022. Vol. 9. No. 3. Pp. 60–67. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-3-60-67

Нами проведены исследования по разработке метода синтеза композитной нанокерамики в системе Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O, которая содержала бы аморфные фазы в виде включений. Целью данной работы была разработка процесса, позволяющего производить достаточно большие объемы конечного продукта с необходимыми физико-химическими и физико-оптическими характеристиками.

В настоящее время одной из актуальных проблем является разработка эффективных методов генерации когерентного терагерцового или дальнего ИК-излучения. Как оказалось, в этом диапазоне неприменимы хорошо разработанные физические принципы генерации оптического и СВЧ-излучений [1]. В этом отношении большие надежды возлагаются на полупроводниковые и оксидные источники [2–4]. Проблема заключается в том, что уникальные свойства функциональная керамика приобретает только при синтезе под воздействием концентрированного солнечного излучения. Например, в случае практического использования состава,

разрабатываемого в данном проекте, необходимо обеспечить условия неравновесной работы излучателей, изготовленных на основе синтезируемой функциональной керамики, за счет создания специальной микроструктуры и фазовых неоднородностей [2; 5]. В этом случае на гетерогенных границах слоя керамического материал происходит нелинейная передача энергии от первичного источника. Такая неравновесность обеспечивает, практически, полное использование энергии первичного источника, обеспечивая максимальную энергоэффективность с получением нового качества.

Для образования метастабильных фаз в таких системах, необходимо воздействовать световым излучением достаточно высокой плотности. Однако, синтез стехиометрического состава можно осуществить и другими путями. Естественно, что необходимым условием проявления описанных эффектов, является образование не только метастабильных фаз, но и образование аморфных фаз, в виде нановключений на границах зерен керамического материала, которые под воздействием импульсного излучения, генерируемого функциональной керамикой, перейдут в материалы с требуемой структурой. Задачей данного этапа работы являлась разработка метода синтеза материалов требуемого стехиометрического состава по [6–7], позволяющего в дальнейшем обеспечить появление таких метастабильных фаз, характеризующихся генерацией импульсов с идентичными характеристиками прототипа в функциональной керамике. Более подробно о механизмах генерации импульсов и ее практическом применении изложено [9–14]. За теоретическую основу принята нобелевская работа Р. Феймана «КЭД – странная теория света и вещества».

Для исследования процесса получения керамики с аморфными включениями была подготовлена шихта, в соответствии с [6] следующего состава: Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O (MgO – 2,0% мас., SiO_2 – 28,0% мас., Fe_2O_3 – 17,0% мас., CaO – 5,0% мас., $A1_2O_3$ – 2,5% мас., CuO – 0,3% мас., Cr_2O_3 – 44,7% мас.). Этот состав находит широкое применение, в том числе и для создания специальных полимерных композитных пленок, способных регулировать окружающий температурный режим.

Порошкообразные образцы были приготовлены из двух компонентов. Первый компонент представлял собой порошок, полученный в результате механохимической обработки смеси порошков оксидов в водной среде со стальными мелющими телами с последующей термообработкой в муфельной печи при температурах 600 – 1250 °C. Соответственно, после каждой термообработки проводилось механохимическое диспергирование реагирующей смеси. Фазовый состав образцов первой составляющей, полученных при различных температурах синтеза, показан на рис. 1 и 2. На рис. 1 приведена рентгеновская дифрактограмма порошка после обжига при 1100 °C, на рис. 2 – после обжига при температуре 800 °C. Таким образом, нами был проведен также анализ механизма образования керамики рассматриваемого состав, формирующегося на первой стадии синтеза.

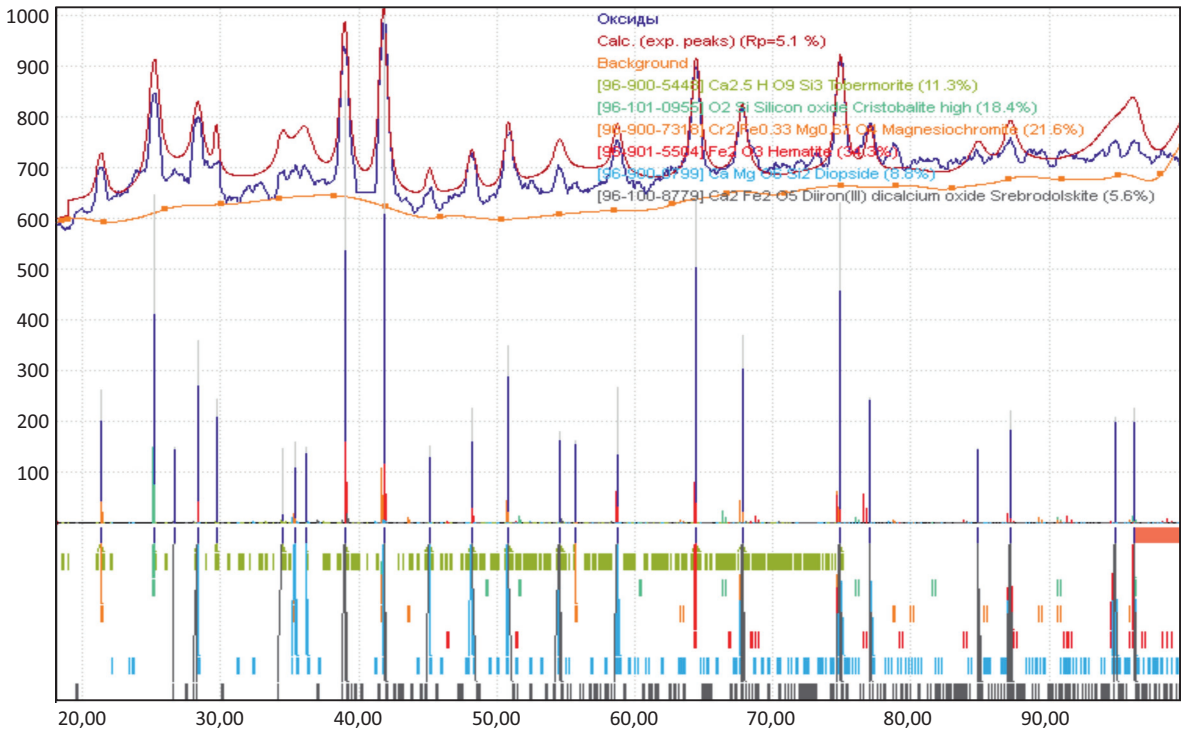

Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма порошка Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O после обжига при 1100 °C

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of powder Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O after firing at 1100 °C

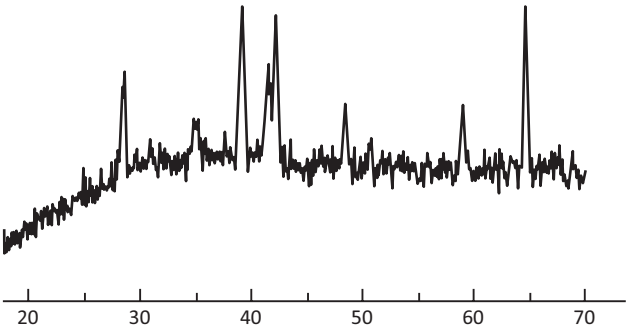

Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма порошка системы Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O после обжига при 800 °C

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of the powder of the system Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O after firing at 800 °C

Анализ фазового состава на дифратограммах был проведен при помощи специальной аналитической программы. Отмечается образование следующих промежуточных фаз: $Cr_2Fe_{0,33}Mg_{0,67}O_4$; SiO_2; $Ca_{2,5}HSi_3O_9$; $CaMgSi_2O_6$; $Ca_2Fe_2O_5$; $(Fe,Cr)_2O_3$. Доля керамики первой составляющей в общем объеме образца составляла 80% мас.

Вторая составляющая была приготовлена в условиях, обеспечивающих синтез порошков в аморфном состоянии (модифицированный золь-гель-метод). Состав образцов в этом случае был тем же, соответствующим составу конечного продукта реакции. Доля керамики второй составляющей в общем объеме образца составляла 20% мас. Проблема, связанная с необходимостью иметь золь оксида кремния была решена за счет разработки специального метода проведения гидролиза ТЭОС (тетраэтоксисилана). В отличии от широко распространенного щелочного гидролиза нами проведен модифицированный кислотный гидролиз. Суть его заключалась в следующем.

ТЭОС смешивали с водой и подкисляли. В растворе формировались силикатные олигомеры очень небольшого размера, которые являлись зародышами структуры образующегося золя. То есть синтез включал стадии гидролиза ТЭОС, поликонденсацию продуктов гидролиза ТЭОС с образованием коллоидного золя, агрегацию коллоидных частиц с образованием гелевой сетки кремнезема (SiO_2).

$$Si(OC_2H_5)_4 + H_2O = (C_2H_5O)_3SiOH + C_2H_5OH. \quad (1)$$

Гидролиз ТЭОС сопровождался конденсацией образующихся силанольных групп друг с другом

$$(C_2H_5O)_3SiOH + (C_2H_5O)_3SiOH = \quad (2)$$
$$= (C_2H_5O)_3Si–O–Si(C_2H_5O)_3 + H_2O.$$

Из-за большого количества технологических параметров золь-гель синтез очень универсален, и поэтому химические свойства и структуру получаемых золь-гель методом материалов можно контролировать, регулируя pH, температуру, молярное соотношение ТЭОС/вода, изменяя количество растворителя и т.д. [8], что и было сделано при выполнении второго этапа. Было установлено, что структура получаемого материала существенно зависит от содержания воды лишь в кислой среде, в то время как содержание воды не оказывает заметного влияния на структуру в нейтральной или щелочной среде. Было также показано влияние содержания воды в реакционной смеси на состав и свойства SiO_2, полученного в процессе гидролиза ТЭОС в кислой среде. Отмечается улучшение качества продукта при увеличении мольного содержания воды в реакционной смеси. В результате был получен очень мелкодисперсный золь, который визуально не отличается от реального раствора.

Дальнейшее получение материала для второй составляющей проходило следующим образом. Синтезированный золь оксида кремния по каплям вносился в раствор нитратов, соответствующий рассматриваемому составу. Полученная суспензия нагревалась до 80 °C при интенсивном перемешивании в течении 4 часов. Далее температура повышалась до 180 °C для испарения воды. После этого образующийся гель помещался в тигель и нагревался в печи до 380 °C. Происходило возгорание геля с образованием мелкодисперсной аморфной твердой фазы.

В данных условиях на рентгенограммах (рис. 3), полученных как после термообработки при 600 °C, так и при 380 °C, отсутствовали заметные рефлексы от кристаллизующихся фаз, отмечалось лишь наличие аморфного гало.

Затем оба компонента смешивались друг с другом при незначительных режимах механохимического воздействия и обжигались в печи при 300 °C в течение двух часов. В результате был получен композитный материал, который наряду с кристаллической фазой включал отдельные участки аморфных нанообразований того же самого состава. Микроструктура полученного порошка представлена на рис. 4. Можно заметить бесформенные образования аморфной фазы более темного цвета.

Микроструктура и концентрации составляющих элементов были изучены с использованием микроскопа LEO 1455 VP с энергодисперсионным спектрометром Aztec Energy Advanced X-Max 80. Точный состав этих фаз был определен методом энергодисперсионного рентгеновского анализа. На рис. 5 представлены карты распределения элементов в одном из участков рассматриваемого образца. Можно заметить, что распределение катионов железа и хрома по разным фазам повторяет друг друга. Вместе с тем, оксид кремния присутствует в образце в основном в тех местах, где наблюдается дефицит или отсутствие железа и хрома.

Изготовление устройства для получения импульсного ИК-излучения на основе рассматриваемой керамики было проведено в Институте материаловедения Академии наук Узбекистана.

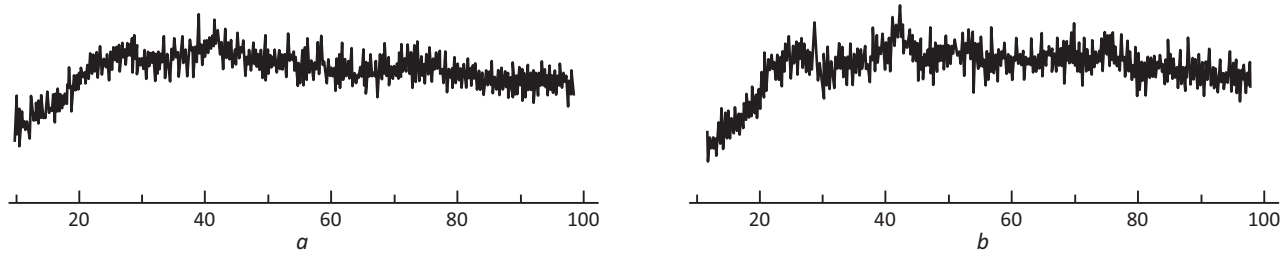

Рис. 3. Рентгеновские спектры порошков второй стадии синтеза керамики системы Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O, полученных по модифицированной золь гель технологии и обожженных:

a – при 380 °C; *b* – при 600 °C

Fig. 3. X-ray spectra of powders of the second stage of synthesis of ceramics of the Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O system obtained by the modified sol-gel technology and fired:

a – at 380 °C; *b* – at 600 °C

Рис. 4. СЭМ микрофотография порошка керамики системы Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O с включениями аморфной фазы, полученного с использованием золь гель технологии и обожженного при 300 °C

Fig. 4. SEM micrograph of a ceramic powder of the Cr–Si–Fe–Ca–Al–Cu–O system with inclusions of an amorphous phase, obtained using the sol-gel technology and fired at 300 °C

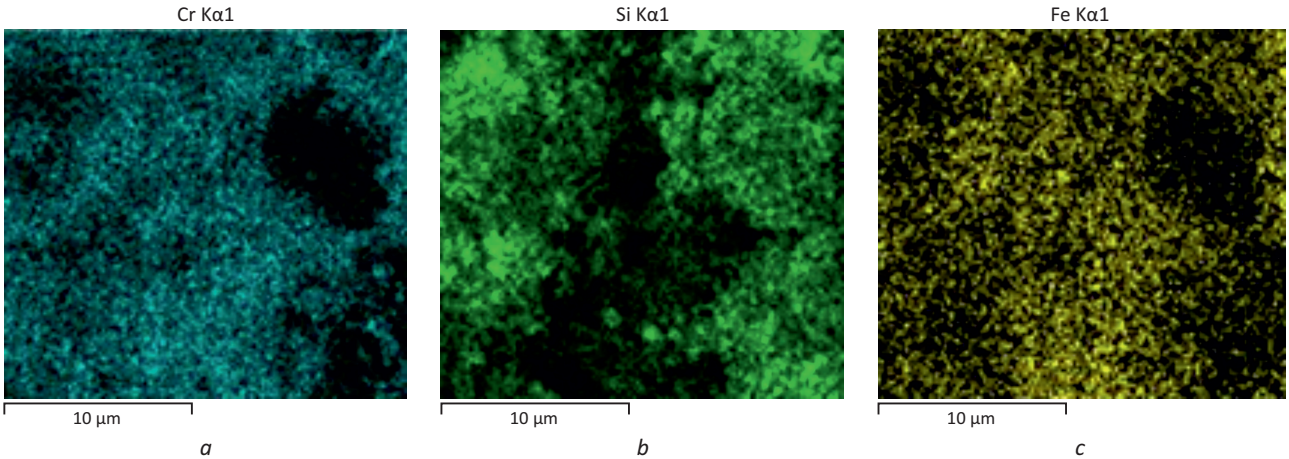

Рис. 5. Концентрационные карты распределения компонентов порошка керамики с включением аморфной фазы, полученного с использованием золь-гель-технологии:

a – Cr; *b* – Si; *c* – Fe

Fig. 5. Concentration maps of the distribution of ceramic powder components with the inclusion of an amorphous phase, obtained using the sol-gel technology:

a – Cr; *b* – Si; *c* – Fe

Образцы помещались в специальную установку, состоящую из отражателя и галогеновых ламп, покрытых функциональной керамикой МС-1. Эта керамика способна преобразовать энергию галогеновых ламп в импульсы ИК, с плотностью энергии в импульсе до 320 Вт/см^2. Под воздействием такого излучения аморфные фазы преобразуются в метастабильные фазы, которые также способны преобразовывать световую энергию в импульсы определенного, узкоспектрального диапазона. Таким образом активировалась синтезированная функциональная керамика.

Затем, полученный таким образом керамический порошок, наносился на галогеновые лампы накаливания. После этого проводили сравнительные испытания излучателя с эталонной функциональной керамикой и синтезированной по предлагаемой схеме, с последующей активацией.

Проведенные испытания установили близкие по значению основные характеристики разработанной по новой технологии керамики, с аналогичными характеристиками устройств, в которых рабочий слой был синтезирован под воздействием концентрированного солнечного излучения.

Полученные результаты показывают, что можно получать керамику, которая после активации, будет удовлетворительно работать в пленочно-керамическом композите. Если углубиться в сравнение синтеза керамики предлагаемым способом и плавлением на солнечной печи, то можно отметить следующее:

1) при синтезе в солнечной печи синтез происходит под мощным потоком концентрированной солнечной энергии с широким спектральным диапазоном, что приводит к образованию всех возможных в этом диапазоне энергий, метастабильных состояний и протеканию всех возможных фотопроцессов;
2) синтез по предлагаемой технологии проходит за счет механохимических и температурных процессов;
3) в солнечной печи синтез происходит в жидкой фазе, что обеспечивает хорошее смешение компонентов и повышает их реакционную способность;
4) по предлагаемой технологии синтез происходит в твердой фазе, поэтому механохимия здесь необходима, так как способствует более полному взаимодействию компонентов;
5) в солнечной печи процессы проходят в одну стадию: синтез, активация, образование метастабильных состояний;
6) по предлагаемому методу, чем больше будет повторяющихся стадий технологического процесса, тем лучшего качества материал будет синтезировать;
7) главным достоинством предлагаемой технологии, является возможность производства функциональной керамики в больших объемах – миллионы тонн в год, так как используются стандартные методы синтеза. В случае использования солнечной печи, мы ограничены ее возможностями. Это составит не более 5–10 тонн в год. Кроме того, в этом случае мы завязаны на погодные условия, в то время как по предлагаемой технологии, эти ограничения отсутствуют.

ВЫВОДЫ

1. Можно констатировать, что предложенная методика, в принципе, позволяет синтезировать матрицу для функциональной керамики с ожидаемыми параметрами.
2. Судя по полученным результатам, предлагаемая технология вполне работоспособна для предварительного синтеза целевых материалов.
3. Относительно низкий уровень генерации импульсов в сравнении с прототипом, может быть обусловлен, как с недостаточным количеством аморфной фазы, так и с необходимостью более тщательного подбора параметров активирующего импульсного излучения.
4. Получены обнадеживающие результаты для производства функциональной керамики для пленочно-керамического композита. Требуется дпльнейшая оптимизация, как процесса синтеза, так и выбора режима активации синтезированной функциональной керамики.

Литература

1. *Van der Weide D*. Applications and outlook for electronic terahertz technology // Optics & Photonics News. 2003. Vol. 14. No. 4. Pp. 48–53.
2. *Рунина К.И.*, *Секачева А.Ю.*, *Петрова О.Б*. Синтез люминесцентных органо-неорганических гибридных материалов твердофазным методом // Успехи в химии и химической технологии. 2020. № 4 (227). С. 80–83.
3. *Рахимов Р.Х*. Большая солнечная печь // Comp. Nanotechnol. 2019. № 2. С. 141–150.
4. *Рахимов Р.Х*. Синтез функциональной керамики на БСП и разработки на ее основе // Comp. Nanotechnol. 2015. № 3. С. 11–25.
5. *Рахимов Р.Х.*, *Ермаков В.П.*, *Рахимов М.Р*. фононный механизм преобразования в керамических материалах // Comp. Nanotechnol. 2017. № 4. С. 21–36.

References

1. *Van der Weide D*. Applications and outlook for electronic terahertz technology. *Optics & Photonics News*. 2003. Vol. 14. No. 4. Pp. 48–53.
2. *Runina K.I.*, *Sekacheva A.Yu.*, *Petrova O.B*. Synthesis of luminescent organic-inorganic hybrid materials by the solid-phase method. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2020. No. 4 (227). Pp. 80–83. (In Rus.)
3. *Rakhimov R.Kh*. Large solar furnace. *Comp. Nanotechnol*. 2019. No. 2. Pp. 141–150. (In Rus.)
4. *Rakhimov R.Kh*. Synthesis of functional ceramics on BSP and developments based on it. *Comp. Nanotechnol*. 2015. No. 3. Pp. 11–25. (In Rus.)
5. *Rakhimov R.Kh.*, *Ermakov V.P.*, *Rakhimov M.R*. Phonon conversion mechanism in ceramic materials. *Comp. Nanotechnol*. 2017. No. 4. Pp. 21–36. (In Rus.)

6. *Рахимов Р.Х., Kim E.V.* Патент США 5472720 от 5 декабря 1995 г.
7. *Рахимов Р.Х., Kim E.V.* Патент США 5350927 от 27сентября 1994 г.
8. *Issa A., Luyt A.S.* Kinetics of alkoxysilanes and organoalkoxysilanes polymerization: A review // Polymers. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 1–41.
9. *Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Рахимов М.Р., Латипов Р.Н.* Особенности синтеза функциональной керамики с комплексом заданных свойств радиационным методом. Часть 6 // Comp. Nanotechnol. 2016. № 3. С. 6–34.
10. *Рахимов Р.Х.* Особенности синтеза функциональной керамики с комплексом заданных свойств радиационным методом. Часть 1 // Comp. Nanotechnol. 2016. № 2. С. 9–27.
11. *Хьюберт Й., Рахимов Р.Х., Петер Д., Ермаков В.П.* Возможности эффективных инноваций // Comp. Nanotechnol. 2020. № 1. С. 15–18.
12. *Рахимов Р.Х., Саидов М.С., Ермаков В.П.* Особенности синтеза функциональной керамики с комплексом заданных свойств радиационным методом. Часть 5. Механизм генерации импульсов функциональной керамикой // Comp. Nanotechnol. 2016. № 2. С. 81–93.
13. *Рахимов Р.Х.* Механизм генерации инфракрасных импульсов функциональной керамикой // Химия и химическая технология. 2013. № 4. С. 2–9.
14. *Фейнман Р.* КЭД – странная теория света и вещества. М.: Астрель, 1985. 194 с.

6. *Rakhimov R.Kh., Kim E.V.* US Patent 5472720. December 5, 1995.
7. *Rakhimov R.Kh., Kim E.V.* US patent 5350927. September 27, 1994.
8. *Issa A., Luyt A.S.* Kinetics of alkoxysilanes and organoalkoxysilanes polymerization: A review. *Polymers*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 1–41.
9. *Rakhimov R.Kh., Ermakov V.P., Rakhimov M.R., Latipov R.N.* Features of the synthesis of functional ceramics with a set of specified properties by the radiation method. Part 6. *Comp. Nanotechnol*. 2016. No. 3. Pp. 6–34. (In Rus.)
10. *Rakhimov R.Kh.* Peculiarities of the synthesis of functional ceramics with a set of specified properties by the radiation method. Part 1. *Comp. Nanotechnol*. 2016. No. 2. Pp. 9–27. (In Rus.)
11. *Hubert J., Rakhimov R.Kh., Peter D., Ermakov V.P.* Opportunities for Effective Innovations. *Comp. Nanotechnol*. 2020. No. 1. Pp. 15–18. (In Rus.)
12. *Rakhimov R.Kh., Saidov M.S., Ermakov V.P.* Features of the synthesis of functional ceramics with a set of specified properties by the radiation method. Part 5. Mechanism of pulse generation by functional ceramics. *Comp. Nanotechnol*. 2016. No. 2. Pp. 81–93. (In Rus.)
13. *Rakhimov R.Kh.* The mechanism of generation of infrared pulses by functional ceramics. *Chemistry and Chemical Technology*. 2013. No. 4. Pp. 2–9. (In Rus.)
14. *Feynman R. QED*: *The* strange theory of light and matter. Moscow: Astrel, 1985. 194 p.

Статья проверена программой Антиплагиат

Р е ц е н з е н т: *Раджапов С.А.*, доктор физико-математических наук; ведущий научный сотрудник Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз (Ташкент, Республика Узбекистан)

Статья поступила в редакцию 12.08.2022, принята к публикации 17.09.2022
The article was received on 12.08.2022, accepted for publication 17.09.2022

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахимов Рустам Хакимович, доктор технических наук; заведующий лабораторией № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6964-9260; E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Паньков Владимир Васильевич, доктор химических наук, профессор; Белорусский государственный университет. Минск, Республика Беларусь. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5478-0194; E-mail: pankovbsu@gmail.com

Ермаков Владимир Петрович, старший научный сотрудник лаборатории № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0632-6680; E-mail: labimanod@uzsci.net

Гайдук Юлиан Станиславович, кандидат химических наук; заведующий лабораторией физической химии конденсированных сред Белорусского государственного университета. Минск, Республика Беларусь. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2737-0434; E-mail: j_hajduk@bk.ru

ABOUT THE AUTHORS

Rustam Kh. Rakhimov, Dr. Sci. (Eng.); Head at the Laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6964-9260; E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Vladimir V. Pankov, Dr. Sci. (Chem.), Professor; Belarusian State University. Minsk, Republic of Belarus. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5478-0194; E-mail: pankovbsu@gmail.com

Vladimir P. Yermakov, senior research at the Laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0632-6680; E-mail: labimanod@uzsci.net

Yulyan S. Haiduk, Cand. Sci. (Chem.); Head of the Laboratory of Physical Chemistry of Condensed Matter of the Belarusian State University. Minsk, Republic of Belarus. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2737-0434; E-mail: j_hajduk@bk.ru

Murod R. Rakhimov, research at the Laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science of the SPA

Рахимов Мурод Рустамович, младший научный сотрудник лаборатории № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: https://orcid. org/0000-0003-0686-5681; E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Мухторов Дильмурод Нумонжонович, ассистент кафедры «Электротехника, электромеханика и электротехнология» Ферганского политехнического института. Фергана, Республика Узбекистан. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7916-5147; E-mail:dimajone0909@gmail.com

"Physics-Sun" of the Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0686-5681; E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Dilmurod N. Mukhtorov, assistant at the Department of Electrical Engineering, Electrical Mechanics and Electrical Technology of the Fergana Polytechnic Institute. Fergana, Republic of Uzbekistan. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7916-5147; E-mail: dimajone0909@gmail.com