



Конденсированные среды и межфазные границы

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3120>

ISSN 1606-867X

Поступила в редакцию 30.10.2020

eISSN 2687-0711

Принята к публикации 15.11.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

УДК 628.978.3:548.736:546.881

Синтез нанолюминофоров $YV_xV_{1-x}O_4$ спрей-пиролитическим и микроволновым методами

© 2020 Е. В. Томина^{a,b} ✉, Д. А. Ласточкин^a, С. А. Мальцев^a

^aВоронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

^bВоронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, 8, Воронеж 394087, Российская Федерация

Аннотация

За счет редкоземельного допирования фосфаты и ванадаты являются ведущими материалами для синтеза люминофоров благодаря их термостойкости, низкой температуре спекания, химической стабильности. Особый интерес привлекают люминофоры в наноразмерном состоянии. Простой, быстрый и масштабируемый синтез нанолюминофоров высокой химической гомогенности является актуальной задачей. Целью работы являлся синтез порошков смешанных кристаллов ванадат-фосфата иттрия различного состава методами соосаждения под действием микроволнового излучения и спрей-пиролиза, а также сравнительный анализ характеристик полученных образцов.

Методами соосаждения под действием микроволнового излучения и спрей-пиролиза в различных режимах синтезированы образцы $YV_xP_{1-x}O_4$ разного состава. Данные рентгенофазового анализа в случае синтеза ванадат-фосфата иттрия $YV_xP_{1-x}O_4$ методом спрей-пиролиза с последующим отжигом подтверждают образование однофазных нанопорошков. Методами просвечивающей электронной микроскопии и растровой электронной микроскопии выявлены морфологические характеристики образцов. В зависимости от режима отжига образцы представляют собой ограниченные либо сферические частицы размером менее 100 нм. Состав образцов $YV_xP_{1-x}O_4$, синтезированных методом соосаждения под действием микроволнового излучения, сильно зависит от pH раствора прекурсоров. Минимальное содержание примесных фаз достигается при pH, равном 9.

Метод спрей-пиролиза позволяет синтезировать нанопорошки ванадат-фосфата иттрия $YV_xP_{1-x}O_4$ высокой химической гомогенности с размером частиц менее 100 нм. При синтезе $YV_xP_{1-x}O_4$ методом соосаждения под действием микроволнового излучения максимальной химической однородности порошков ванадат-фосфата иттрия удается достигнуть при pH = 9. Однако дисперсия частиц по размеру велика, лежит в интервале 2–60 мкм.

Ключевые слова: люминофоры, микроволновый синтез, спрей-пиролиз, нанопорошки, ванадат-фосфат иттрия.

Для цитирования: Томина Е. В., Ласточкин Д. А., Мальцев С. А. Синтез нанолюминофоров $YV_xV_{1-x}O_4$ спрей-пиролитическим и микроволновым методами. Конденсированные среды и межфазные границы. 2020;22(4): 496–503. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3120>

For citation: Tomina E. V., Lastochkin D. A., Maltsev S. A. The synthesis of nanophosphors $YV_xV_{1-x}O_4$ by spray pyrolysis and microwave methods. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(4): 496–503. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3120>

✉ Томина Елена Викторовна, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Сферы применения люминесцентных материалов разнообразны: приборы освещения, биологические маркировки, плазменные панели, биомедицина [1–4]. Особый интерес привлекают люминофоры в наноразмерном состоянии. Фосфаты и ванадаты являются ведущими материалами для синтеза люминофоров за счет редкоземельного допирования благодаря их термостойкости, низкой температуре спекания, химической стабильности и экологичности [5]. Системы смешанных кристаллов ванадат-фосфатов демонстрируют лучшие люминесцентные свойства по сравнению с соответствующими ванадатами и фосфатами [6]. Так, квантовые выходы наночастиц ванадат-фосфата, допированного европием, достигают 20 % и такие смешанные кристаллы потенциально могут быть красным излучающим люминофором для PDP [7–9].

Нанофосфоры можно синтезировать зольгель, гидротермальным, микроэмульсионным методами [10–15]. Использование микроволнового нагрева приводит к значительному увеличению скорости реакции и позволяет уменьшить время синтеза от нескольких часов или дней до нескольких минут при увеличении чистоты целевого продукта [16–18]. Синтез нанопорошков методом пиролиза аэрозолей обладает целым рядом преимуществ: высокая производительность, особая чистота конечного продукта, возможность контроля морфологии и малые энергозатраты. Благодаря простоте и дешевизне широко востребован спрей-пиролиз аэрозолей (CSP) [19]. Продукты пиролитического синтеза находят применение в таких областях, как катализ, хроматография, изготовление пигментов и фотолюминесцентных материалов.

Цель работы – синтез смешанных кристаллов ванадат-фосфата иттрия методами соосаждения под действием микроволнового излучения и спрей-пиролиза.

2. Экспериментальная часть

Прекурсорами выступали оксид ванадия (V) V_2O_5 (ЧДА ТУ 6-09-4093-88), натрий фосфорнокислый Na_3PO_4 (ЧДА ОКП 26 2112 1152 00 ГОСТ 9337-79), иттрий азотнокислый $Y(NO_3)_3$ (ЧДА CAS 13494-98-9), гидроксид натрия NaOH (ЧДА ГОСТ 432877). Для синтеза метаванадата натрия оксид ванадия (V) и гидроксид натрия смешивали в эквивалентном соотношении, предварительно растворив их в дистиллированной воде. К полученному раствору добавляли эквивалентные количества ортофосфата нат-

рия и нитрата иттрия, воздействовали микроволновым излучением (P_{max} источника – 800 Вт, рабочая частота – 2450 МГц) три раза в течение 5 мин при мощности 800 Вт. При этом pH раствора поддерживали в диапазоне от 7 до 9. Синтезированный порошок подвергали ультразвуковому диспергированию (ультразвуковая ванна ВУ-09-«Я-ФП»-0) в течение 10–15 минут. После фильтрации порошок сушили в течение двух суток, измельчали в ступке и отжигали в муфельной печи (SNOL 8,2/1100) при температуре 800 °С в течение 1–2 часов.

При синтезе ванадат-фосфата иттрия методом спрей-пиролиза оксид ванадия (V) V_2O_5 смешивали в эквивалентном количестве с NaOH для получения метаванадата натрия ($NaVO_3$). Затем к раствору при интенсивном перемешивании добавляли стехиометрическое количество кристаллогидратов нитрата иттрия $Y(NO_3)_3$, фосфата натрия Na_3PO_4 и концентрированную азотную кислоту HNO_3 (ГОСТ 4461-77) для предотвращения гидролиза раствора в диспергаторе. Синтез наночастиц проводили в установке для спрей-пиролиза (рис. 1).

Раствор порционно заправляли в диспергатор, который через патрубки соединен с компрессором и реактором из кварцевой трубки. Диспергатор распылял раствор в виде аэрозоля в реактор печи МТП-2М, разогретый до температуры 600 °С. Температура контролировалась терморегулятором ОВЕН ТРМ1-Щ1.У.Р с погрешностью ± 1 °С. В печи под действием температуры аэрозоль пиролитически разлагался с образованием ванадат-фосфата иттрия. Сбор нанопорошка осуществляли в стакан с дистиллированной водой, затем отфильтровывали, высушивали на воздухе и подвергали термическому отжигу в муфельной печи (SNOL 8,2/1100) для перекристаллизации и полной дегидратации при температуре 800 °С в течение 1–2 часов.

Определение фазового состава синтезированных порошков осуществляли методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием дифрактометра ARL X'TRA (Cu $K_{\alpha 1}$ с $\lambda = 1.540562$ Å) в непрерывном режиме. Размер областей когерентного рассеивания (ОКР) по данным рентгенофазового анализа (РФА) для образцов ванадат-фосфата иттрия рассчитывали по формуле Шеррера [20]:

$$D_{hkl} = \frac{kx\lambda}{\beta_{hkl} \times \cos \theta},$$

где D_{hkl} – средний размер частиц, Å, k – поправочный коэффициент (для кубической и орто-

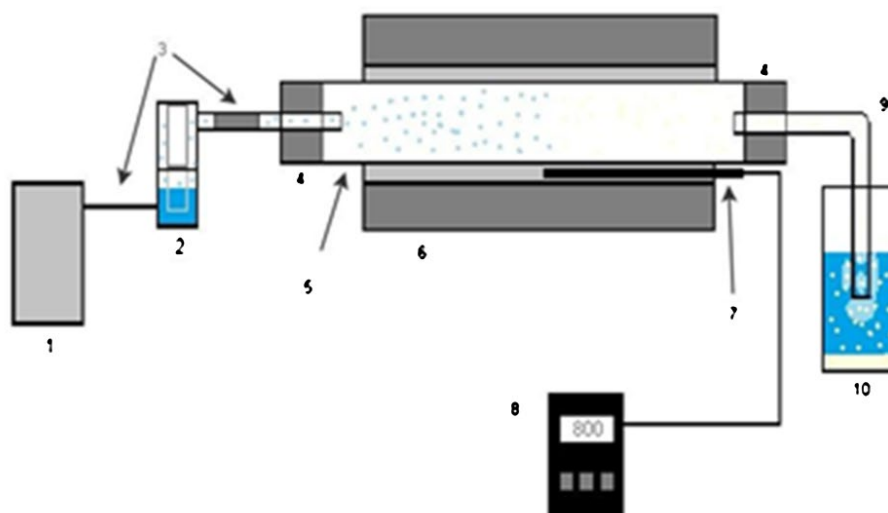


Рис. 1. Схема установки спрей-пиролиза. 1 – компрессор, 2 – диспергатор, 3 – патрубки, 4 – резиновая пробка, 5 – реактор (кварцевая трубка), 6 – печь МТП–2М, 7 – термопара, 8 – терморегулятор, 9 – стеклянная трубка с поворотом на 90°, 10 – стакан с дистиллированной водой для сбора нанопорошка

ромбической структуры $k = 0.9$), λ – длина волны рентгеновской трубки, θ – положение максимума пика, град., β_{hkl} – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад.

Определение количественного элементного состава синтезированных образцов проводили методом локального рентгеноспектрального микроанализа (ЛРСМА, растровый электронный микроскоп JEOL-6510LV с системой энергодисперсионного микроанализа Bruker). Размер и морфологию частиц синтезированных порошков определяли по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, просвечивающий электронный микроскоп CarlZeiss Libra-120).

3. Результаты и обсуждения

Согласно [6] стабильность и высокотемпературные люминесцентные свойства допированных ванадатов иттрия могут быть улучшены путем частичной замены VO_4^{3-} -аниона изоструктурным ему анионом PO_4^{3-} . Присутствие фосфат-аниона стабилизирует степень окисления ванадия +5, что способствует увеличению выхода люминесценции. Допирование анионной составляющей ванадата иттрия анионом меньшего размера сопровождается уменьшением размеров кристаллитов при тех же условиях реакции. Представляется перспективным осуществить синтез смешанных кристаллов ванадат-фосфата иттрия за счет допирования фосфата иттрия ванадат-анионами.

Первая серия образцов ванадат-фосфатов иттрия составов $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ и $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$, синтези-

рованных под действием микроволнового излучения с последующим ультразвуковым диспергированием, содержит преимущественно фазу YPO_4 . Однако на дифрактограммах $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ присутствуют рефлексы оксидов ванадия VO_2 и иттрия Y_2O_3 (рис. 2). Изменение pH раствора с 7 до 9 снижает содержание примесей в синтезированных порошках ванадат-фосфата иттрия (рис. 3). Для образцов $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$, синтезированных при pH, равном 8, в качестве основных примесных фаз фиксируются оксиды ванадия VO_2 и иттрия Y_2O_3 (рис. 2). Рефлексы этих оксидов не дифференцируются на дифрактограмме с увеличением pH раствора прекурсоров с 8 до 9 (рис. 3).

В результате синтеза ванадат-фосфата иттрия составов $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ и $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$ методом спрей-пиролиза без последующего отжига формируются образцы, содержащие смесь фаз: оксид иттрия Y_2O_3 , оксиды ванадия VO_2 , V_2O_5 , и ванадаты натрия. Высокий фон позволяет предположить достаточно большую степень аморфности образцов. Дифрактограмма синтезированного спрей-пиролизом и отожженного в муфельной печи при температуре 800 °C в течение 1 часа образца $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ (рис. 4а) содержит рефлексы только фосфата иттрия. Малая ширина рефлексов позволяет говорить о высокой степени кристалличности образца. Увеличение времени отжига до 2 часов (рис. 4б) сопровождается ростом интенсивности рефлексов YPO_4 . Отсутствие на дифрактограммах ванадийсодержащих соединений свидетельствует о встраивании ванадия в виде ванадат-ионов в кристаллическую решетку фосфата иттрия. Среднее значение ОКР ча-

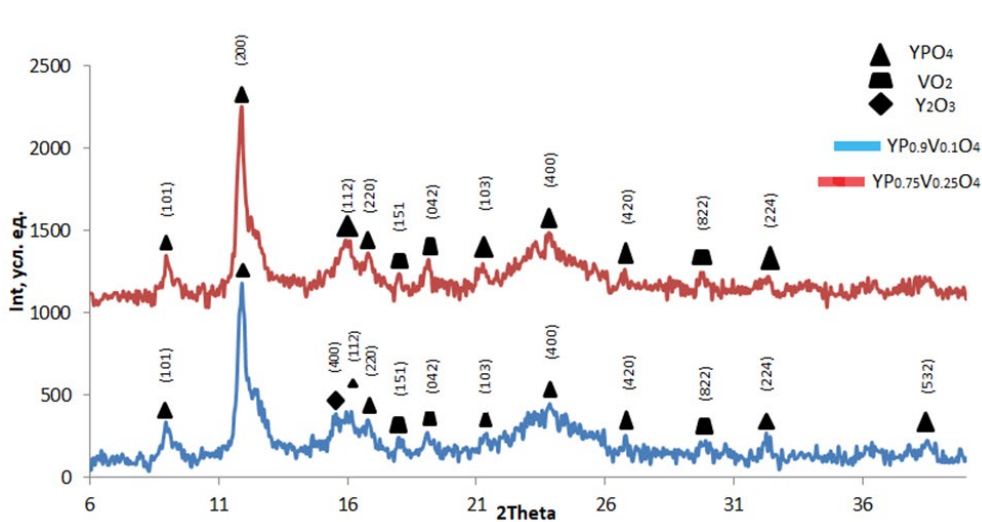


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма образцов, микроволновый синтез: а) $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ (рН = 7) и б) $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$ (рН = 8)

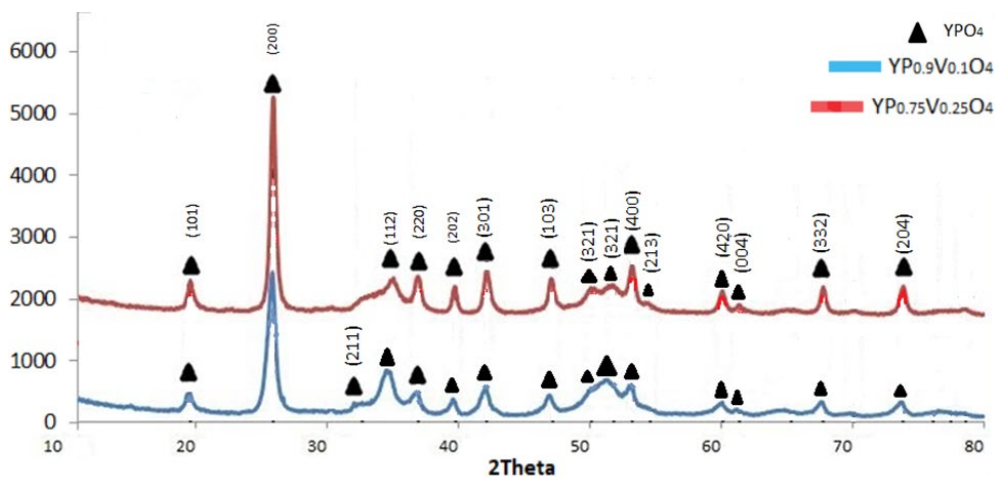


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограмма образцов, микроволновый синтез, рН = 9: а) $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$; б) $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$

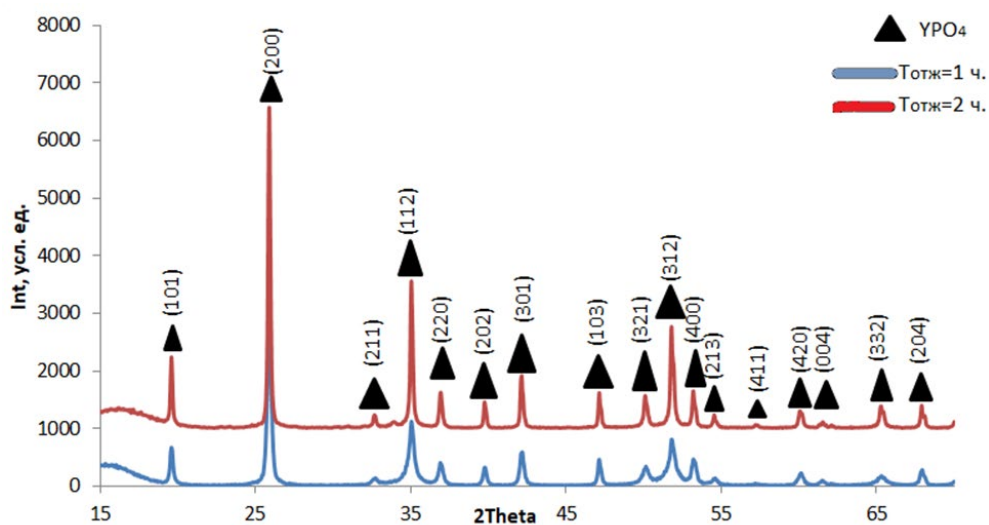


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы образцов $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$, спрей-пиролиз: а) отжиг 1 час и б) отжиг 2 часа

стиц образца $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ отожженного в течение 1 часа составляет 50 ± 2 нм (табл. 1). Отжиг в течение 2 часов приводит к росту ОКР до 93 ± 2 нм.

На энергодисперсионном спектре образца $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$, синтезированного методом соосаждения под воздействием микроволнового излучения при pH, равном 7, регистрируются только сигналы Y, P и O (рис. 5а). Видимо, в нейтральном растворе не происходит встраивания ионов V^{5+} в решетку YPO_4 , что подтверждается и данными РФА о присутствии в этих образцах в качестве примесей различных оксидов ванадия. Увеличение pH раствора прекурсоров до 8 позволяет зафиксировать на энергодисперсионном спектре сигналы ванадия (рис. 5б). Од-

нако их интенсивность низка, реальный состав образца по ванадию практически на порядок отклоняется от номинального состава (табл. 2). Очевидно, что осуществляется лишь частичное встраивание вводимых ионов V^{5+} в решетку YPO_4 , основной массив ионов ванадия присутствует в виде примесных оксидов. И только повышение pH до 9 позволяет синтезировать образцы, реальный состав которых приближен к номинальному (табл. 2).

Морфологически образцы ванадат-фосфата иттрия, синтезированного методом соосаждения под действием микроволнового излучения при pH = 8, представлены крупными образованиями размером до 60 мкм произвольной формы,

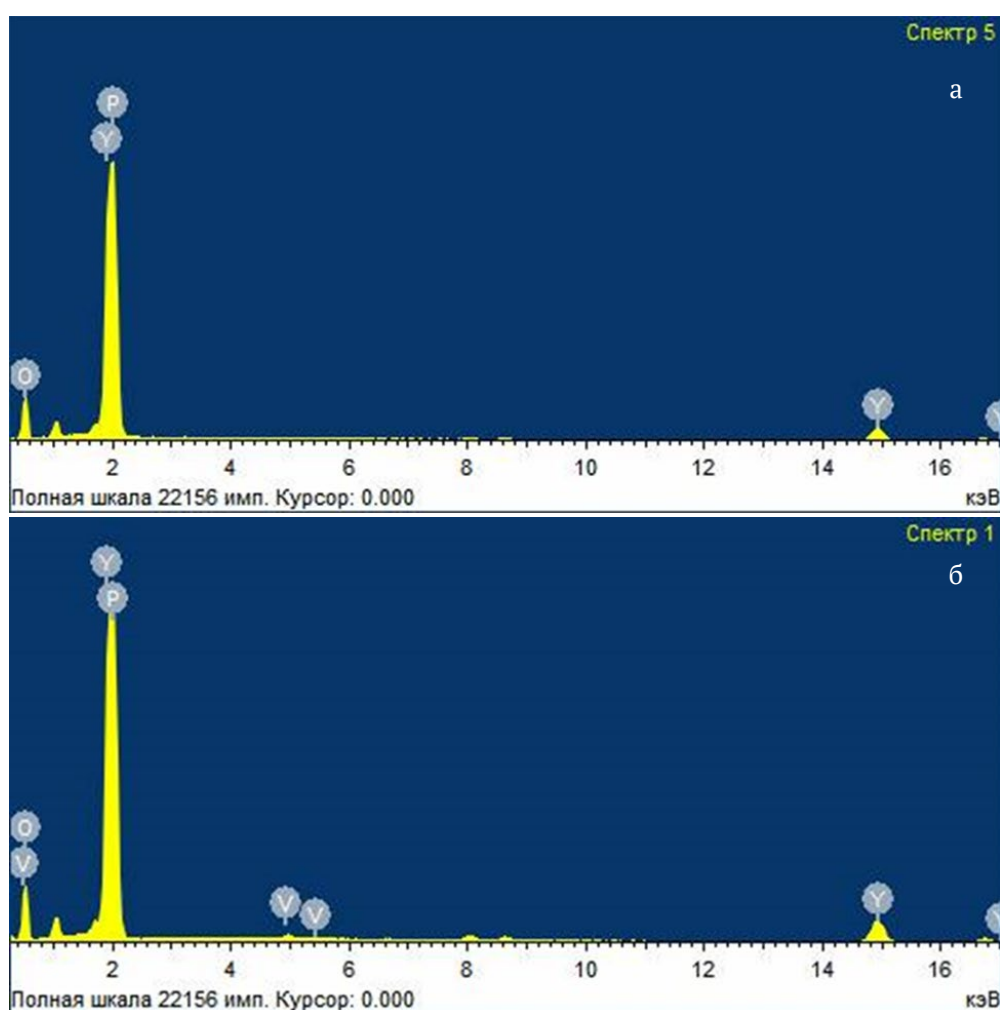


Рис. 5. Энергодисперсионный спектр образцов, спрей-пиролитиз: а) $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$ (pH = 7); б) $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$ (pH = 8)

Таблица 1. Радиус ОКР частиц образцов $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$, синтезированных методом спрей-пиролитиза

Образец	D_1	D_2	D_3	D_{cp}
Образец $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ ($t_{отж} = 1$ ч)	27 ± 1	41 ± 2	54 ± 3	41 ± 2
Образец $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$ ($t_{отж} = 2$ ч)	99 ± 2	73 ± 2	106 ± 2	93 ± 2

Таблица 2. Данные элементного состава ванадат-фосфатов (pH = 7, pH = 8, pH = 9)

Номинальный состав образцов	$YV_{0.1}P_{0.9}O_4$, pH = 7	$YV_{0.25}P_{0.75}O_4$, pH = 8	$YV_{0.25}P_{0.75}O_4$, pH = 9
Y (номинальный), ат. %	16.6	16.6	16.6
Y (реальный), ат. %	11.94	12.2	16.18
V (номинальный), ат. %	1.6	4.16	4.16
V (реальный), ат. %	0.1	0.24	5.97
P (номинальный), ат. %	15	12.5	12.5
P (реальный), ат. %	13.74	13.78	11.42
O (номинальный), ат. %	66.6	66.6	66.6
O (реальный), ат. %	74.22	73.77	64.31
Реальный состав образцов	$YV_{0.008}P_{1.15}O_{6.21}$	$YV_{0.02}P_{1.15}O_{6.17}$	$YV_{0.36}P_{0.68}O_{3.97}$

и более мелкими аморфизированными частицами от 2 до 10 мкм (рис. 6).

По данным ПЭМ (рис. 7) частицы $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$, синтезированного методом спрей-пиролиза и отожженного при 800 °С в течение 1 часа, огранены, имеют размер в интервале 25–100 нм, наблюдается слабо выраженная агломерация (рис. 7а). Увеличение времени отжига до 2 часов способствует формированию более крупных частиц сферической формы (рис. 7б).

4. Выводы

Установлено, что метод спрей-пиролиза с последующим отжигом позволяет синтезировать нанопорошки ванадат-фосфата иттрия высокой химической гомогенности с размером в интервале

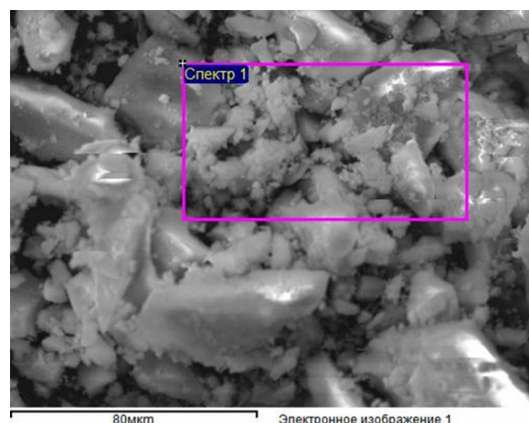


Рис. 6. РЭМ изображение порошка $YV_{0.25}P_{0.75}O_4$, синтезированного методом соосаждения под действием микроволнового излучения, (pH = 8)

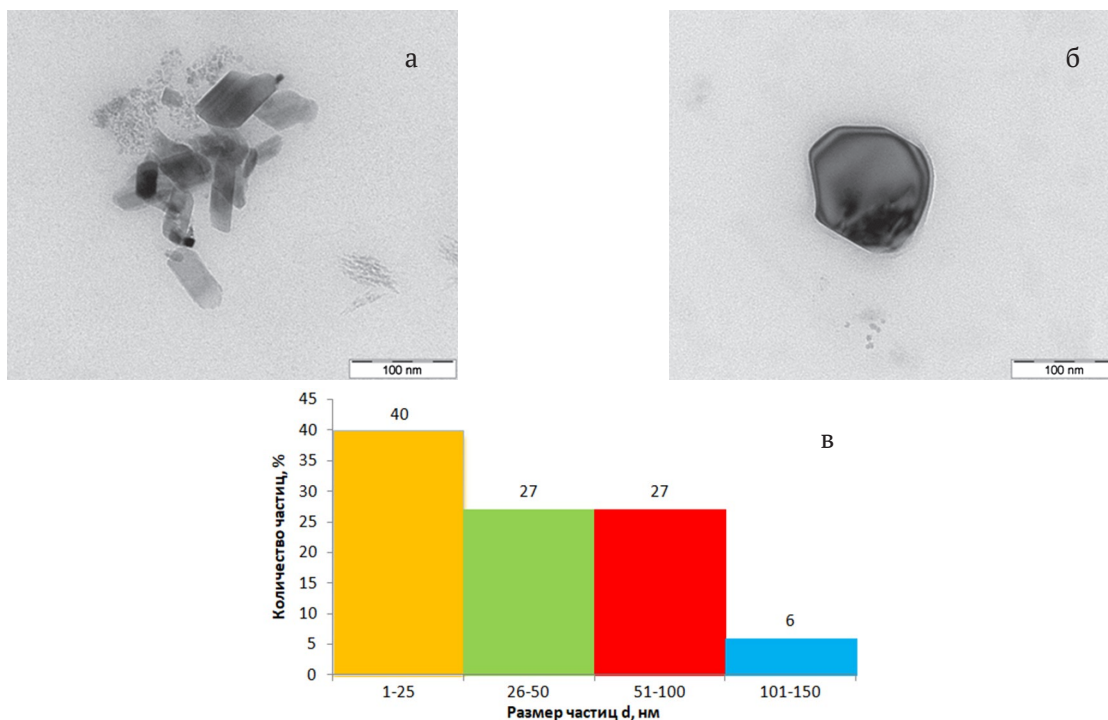


Рис. 7. ПЭМ изображение образца $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$, синтезированного методом спрей-пиролиза, в желатиновом слое: а) отжиг в режиме 800 °С, 1 час; б) отжиг в режиме 800 °С, 2 часа; в) гистограмма распределения частиц образца $YV_{0.1}P_{0.9}O_4$

20–100 нм с малой степенью агломерации. Изменение режима отжига позволяет управлять размером и формой частиц.

Синтез $Y_xV_{1-x}O_4$ методом соосаждения под действием микроволнового излучения вследствие высокой чувствительности к pH раствора прекурсоров сопровождается присутствием примесных фаз в образцах. Максимальная химическая однородность порошков ванадат-фосфата иттрия достигается при pH = 9. Дисперсия частиц по размеру велика и находится в интервале 2–80 мкм.

Благодарности

Результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>.

Конфликт интересов

Информация о конфликте интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Список литературы

1. Wu C., Wang Y., Jie W. Hydrothermal synthesis and luminescent properties of $LnPO_4:Tb$ ($Ln = La, Gd$) phosphors under VUV excitation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2007;436: 383–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.07.056>

2. Huang J., Tang L., Chen N., Du G. Broadening the photoluminescence excitation spectral bandwidth of $YVO_4:Eu^{3+}$ nanoparticles via a novel core-shell and hybridization approach. *Materials*. 2019;12: 3830. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12233830>

3. Wu Y., Zhang Z., Suo H., Zhao X., Guo C. 808 nm light triggered up-conversion optical nano-thermometer $YPO_4:Nd^{3+}/Yb^{3+}/Er^{3+}$ based on FIR technology. *Journal of Luminescence*. 2019;214: 116478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116578>

4. Xiu Z., Wu Y., Hao X., Li X., Zhang L. Uniform and well-dispersed $Y_2O_3:Eu/YVO_4:Eu$ composite microspheres with high photoluminescence prepared by chemical corrosion approach. *Colloids Surf. A*. 2012;401(5): 68–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.03.021>

5. Vats B. G., Gupta S. K., Keskar M., Phatak R., Mukherjee S., Kannan S. The effect of vanadium substitution on photoluminescent properties of $KSrLa(PO_4)_x(VO_4)_{2-x}:Eu^{3+}$ phosphors, a new variant of phosphovanadates. *New Journal of Chemistry*. 2016;40(2): 1799–1806. DOI: <https://doi.org/10.1039/c5nj02951a>

6. Riwozki K., Haase M. Colloidal $YVO_4:Eu$ and $Y_{0.95}V_{0.05}O_4:Eu$ nanoparticles: luminescence and energy transfer processes. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2001;105(51): 12709–12713. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp0113735>

7. Wu C.-C., Chen K.-B., Lee C.-S., Chen T.-M., Cheng B.-M. Synthesis and VUV photoluminescence characterization of $(Y,Gd)(V,P)O_4:Eu^{3+}$ as a potential red-emitting PDP phosphor. *Chem. Mater.* 2007;19(13): 3278–3285. DOI: <https://doi.org/10.1021/cm061042a>

8. Shimomura Y., Kurushima T., Olivia R., Kijima N. Synthesis of $Y(P,V)O_4:Eu^{3+}$ red phosphor by spray pyrolysis without postheating. *The Japan Society of Applied*. 2005;44(3): 1356–1360. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.1356>

9. Lai H., Chen B., Xu W., Xie Y., Wang X., Di W. Fine particles $(Y,Gd)P_xV_{1-x}O_4:Eu^{3+}$ phosphor for PDP prepared by coprecipitation reaction. *Materials Letters*. 2006;60(11): 1341–1343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.11.051>

10. Singh V., Takami S., Aoki N., Hojo D., Arita T., Adschiri T. Hydrothermal synthesis of luminescent $GdVO_4:Eu$ nanoparticles with dispersibility in organic solvents. *Journal of Nanoparticle Research*. 2014;16(5): 2378. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2378-2>

11. Song W.-S., Kim Y.-S., Yang H. Hydrothermal synthesis of self-emitting $Y(V,P)O_4$ nanophosphors for fabrication of transparent blue-emitting display device. *Journal of Luminescence*. 2012;132(5): 1278–1284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2012.01.015>

12. Yu M., Lin J., Fu J., Han Y. Sol-gel fabrication, patterning and photoluminescent properties of $LaPO_4:Ce^{3+}, Tb^{3+}$ nanocrystalline thin films. *Chemical Physics Letters*. 2003;5(1-2): 178–183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(03\)00239-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(03)00239-2)

13. Raoufi D., Raoufi T. The effect of heat treatment on the physical properties of sol-gel derived ZnO thin films. *Applied Surface Science*. 2009;255(11): 5812–5817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2009.01.010>

14. Shao J., Yan J., Li X., Li S., Hu T. Novel fluorescent label based on $YVO_4:Bi^{3+}, Eu^{3+}$ for latent fingerprint detection. *Dyes and Pigments*. 2019;160: 555–562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.08.033>

15. Dolinskaya Yu. A., Kolesnikov I. E., Kurochkin A. V., Man'shina A. A., Mikhailov M. D., Semenchina A. V. Sol-Gel synthesis and luminescent properties of $YVO_4:Eu$ nanoparticles. *Glass Physics and Chemistry*. 2013;39(3): 308–310. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1087659613030061>

16. Томина Е. В., Сладкопцев Б. В., Миттова В. О., Кнурова М. В., Латышев А. Н., Миттова И. Я. Микроволновый синтез и люминесцентные свойства $YVO_4:Eu^{3+}$. Неорганические материалы. 2016;52(5): 495–498. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002337X16050171>

17. Томина Е. В., Миттова И. Я., Бурцева Н. А., Сладкопцев Б. В. Способ синтеза люминофора на основе ортованадата иттрия: патент на изобретение № 2548089. Патентообладатель ФГБОУ ВПО

«Воронежский государственный университет». № 2013133382/05; заявл. 12.11.2013; опублик. 20.05.2015.

18. Томина Е. В., Куркин Н. А., Мальцев С. А. Микроволновый синтез ортоферрита иттрия и допирование его никелем. Конденсированные среды и межфазные границы. 2019;21(20): 306–312. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2019.21/768>

19. Huang J., Gao R., Lu Z., Qian D., Li W., Huang B., He X. Sol-gel preparation and photoluminescence enhancement of Li⁺ and Eu³⁺ co-doped YPO₄ nanophosphors. *Optical Materials*. 2010;32(9): 857–861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2009.12.011>

20. Brandon D., Kaplan W. D. *Microstructural Characterization of Materials*. John Wiley & Sons Ltd; 1999. 409 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470727133>

Информация об авторах

Томина Елена Викторовна, д. х. н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>.

Ласточкин Дмитрий Алексеевич, магистрант 1 года обучения, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: lastochkin.d1998@mail.ru

Мальцев Сергей Анатольевич, магистрант 2 года обучения, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: sergmaltsev97@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.