

## **Влияние хемосорбции поливинилпирролидона на формирование карбонатных прекурсоров оптически прозрачной керамики $Y_{2-x}Yb_xO_3$**

**Г. Б. Тельнова, А. А. Коновалов, А. И. Ситников, К. А. Солнцев**

---

Проведен комплекс сравнительных экспериментальных исследований процесса осаждения карбонатных соединений иттрия с иттербием из раствора азотнокислых солей и поверхностно активного полимера N – винилпирролидона (ПВП) избытком гидрокарбоната аммония, механизмов кристаллизации прекурсоров в вязких низкоразмерных дисперсных системах в интервале пограничных концентраций ПВП, реологических свойств наносuspензий, влияющих на эти процессы. Выявлены условия и основные закономерности формирования двойного гидрокарбоната  $(Y,Yb)(OH)CO_3 \cdot nH_2O$  в вязкой среде осаждения. Разработаны методики синтеза гидрокарбоната с контролируемыми формами выделения и размерами наночастиц, из которых после термообработки при  $1100^\circ C$  получены гомогенные, близкие к монодисперсным нанопорошки кубических твердых растворов на основе оксида иттрия заданных составов  $Y_{2-x}Yb_xO_3$  с размерами частиц от 31 нм, используемых для получения прозрачной керамики на основе допированного оксида иттрия.

**Ключевые слова:** N – винилпирролидон, смешанный карбонат, смешанный гидрокарбонат, кубический твердый раствор на основе оксида иттрия, оптически прозрачная керамика, нанопорошки, электрокинетический потенциал дисперсной системы (дзета-потенциал).

---

A complex of comparative experimental studies of the process of precipitation of Y/Yb carbonate compounds from a solution of their nitrates and a surface-active polymer of N-vinylpyrrolidone (PVP) with an excess amounts of ammonium hydrocarbonate, crystallization and aggregation mechanisms of the precursor particles in viscous low-dimensional disperse systems, and rheological properties of nanosuspensions affecting those processes allowed to determine conditions and basic principles of formation of the "mixed" hydrocarbonate  $(Y,Yb)(OH)CO_3 \cdot nH_2O$  in the precipitation medium in an interval of borderline concentrations of PVP. We have developed methods for synthesis of the hydrocarbonate with controlled precipitation forms and nanosized particles, which were converted by thermal treatment at  $1100^\circ C$  into homogeneous, nearly monodisperse nanopowders of  $Y_{2-x}Yb_xO_3$ -based cubic solid solutions with grain size  $\leq 31$  nm for production of transparent ceramics on the basis of the doped yttria.

**Key words:** N-vinylpyrrolidone polymer, "mixed" carbonate, "mixed" hydrocarbonate, yttria-based cubic solid solution, optically transparent ceramics, nanopowders, electrokinetic potential of a disperse system (zeta-potential).

### **Введение**

Высокопрозрачная керамика из кубического оксида иттрия, активированного ионами лантанидов — перспективный материал для использования в лазерной технике, поскольку обладает рядом высоких эксплуатационных характеристик, таких как оптическая изотропность, тугоплавкость, структурная устойчивость до высоких температур, прозрачность в широкой области спектра, высокая твердость, тепло-

проводность и термостойкость. Однако сложность получения высокоплотных изделий (с относительной плотностью более 99 %) при приемлемых температурах спекания без использования традиционных, интенсифицирующих процесс спекания добавок  $HfO_2$ ,  $ThO_2$  или  $ZrO_2$ , которые в сочетании с некоторыми лантанидами, такими как  $Eu^{+3}$ , могут снижать интенсивность люминесценции в связи с образованием паразитических электронных уровней, заставляет искать новые подходы к решению проблемы

синтеза высокоактивных к спеканию исходных порошков оксида иттрия. Порошки оксида иттрия для лазерных материалов должны соответствовать следующим требованиям: нанометровые размеры частиц, высокая химическая и фазовая гомогенность, монодисперсность, отсутствие агломерации, отсутствие примесей, соответствие химического и фазового состава заданному. Одним из перспективных методов получения нанодисперсных порошков оксида иттрия считается метод термического разложения карбоната иттрия  $Y_2(CO_3)_3 \cdot nH_2O$ , где  $n=2$  или  $3$  [1]. Однако задача количественного соосаждения композиций карбонатных соединений иттрия и лантанида является весьма сложной и многоплановой в практической реализации, что связано с возможностью образования растворимых гидрокарбонатов редкоземельных элементов и необходимостью противодействия быстрой кристаллизации и росту кристаллов карбонатного осадка в среде осаждения.

Цель настоящих исследований — изучение особенностей формирования карбонатных соединений иттрия с иттербием при их осаждении гидрокарбонатом аммония из раствора азотнокислых солей в присутствии поверхностно активного ПВП.

### Методика эксперимента

Исследования выполнены для составов  $80,4 Y_2O_3 \times 19,6 Yb_2O_3$  (эксперимент 1) и  $75,5 Y_2O_3 \cdot 19,6 Yb_2O_3 \times 4,9 HfO_2$  (эксперимент 2) при содержании 8 ат. % Yb. Двойные гидроксокарбонаты  $(Y, Yb)(OH)(CO_3) \cdot nH_2O$  получены химическим осаждением из 1 М раствора нитрата иттрия в смеси с нитратом иттербия трехкратным избытком 2,5 М раствора гидрокарбоната аммония при значении pH 8 в присутствии ПВП с молекулярной массой 58000. Концентрацию ПВП в среде осаждения изменяли от 0,75 масс. % в первом до 2,25 масс. % во втором экспериментах. Полученные осадки обрабатывали ультразвуком в течение 10 мин, а затем выдерживали в среде осаждения при комнатной температуре в течение соответственно 60 и 90 часов при непрерывном перемешивании магнитной мешалкой.

Эксперимент направлен на замедление процесса старения осадка, а именно, на противодействие агломерации и росту частиц за счет уменьшения поверхностной энергии системы и степени ее неравновесности, вследствие адсорбции высокомолекулярного поверхностно активного соединения на поверхности частиц дисперсной фазы.

Физико-химические процессы, протекающие в дисперсных системах при их старении, исследовали на установке Spectrometer DT-1200 производства

Dispersion Technology corp. (США). Эта установка предназначена для определения  $\xi$ -потенциала, размеров частиц и вязкости высококонцентрированных коллоидных растворов, суспензий, в частности, непрозрачных, с концентрацией частиц до 50 масс. %, и эмульсий. В установке DT-1200 реализован метод электроакустической спектроскопии [2], основанный на эффекте возникновения ультразвуковых (УЗ) волн при наложении переменного электрического поля на суспензию заряженных частиц, которые в процессе колебаний испытывают трение с дисперсионной средой. При помощи автоматизированного программного обеспечения установка DT-1200 из соотношения частотных характеристик наложенного электрического поля и возникших УЗ-колебаний позволяет рассчитывать и осуществлять графическую обработку полученных данных для среднего размера частиц твердой дисперсной фазы, распределения их по размерам, электрокинетического потенциала ( $\xi$ -потенциал) и вязкости системы.

Фазовый состав продуктов осаждения изучали на порошковых препаратах с использованием монохроматизированного  $Cu K_\alpha$ -излучения на дифрактометре фирмы “Shimadzu”, позволяющем при помощи стандартного автоматизированного программного обеспечения осуществлять съемку образцов, математическую и графическую обработку дифрактограмм и идентификацию фазового состава по банку JCPDS (интернациональному банку порошковых дифракционных стандартов). Оценка среднего размера областей когерентного рассеяния (ОКР) для гидроксокарбоната  $(Y, Yb)(OH)(CO_3) \cdot nH_2O$  выполнена для 100%-го дифракционного максимума ( $2\theta \sim 10,1$  град.) и по отражению (222) для твердого раствора на основе кубического оксида иттрия состава  $Y_{2-x}Yb_xO_3$  по формуле Селякова – Шеррера:  $D_{hkl} = \lambda / \beta \cos \theta$ , где  $\lambda$  — длина волны  $Cu K_\alpha$ -излучения;  $\beta$  — полуширина пика, рад.;  $\theta$  — местоположение пика, град.

ИК-спектрометрические исследования прекурсоров проводили на спектрометре Nicolet Avatar 330 FT-IR с разрешающей способностью 4, числом сканов 4 в режиме диффузного отражения с использованием KBr в качестве эталона. Спектры регистрировали в диапазоне частот от 500 до  $4000 \text{ см}^{-1}$ . По характерным полосам поглощения оценивали присутствие видов  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $H_2O$  и др.

### Результаты и обсуждение

Устойчивость низкоразмерных дисперсных систем частиц неорганических материалов в воде и органических средах в основном обеспечивается электростатическим отталкиванием одноименно

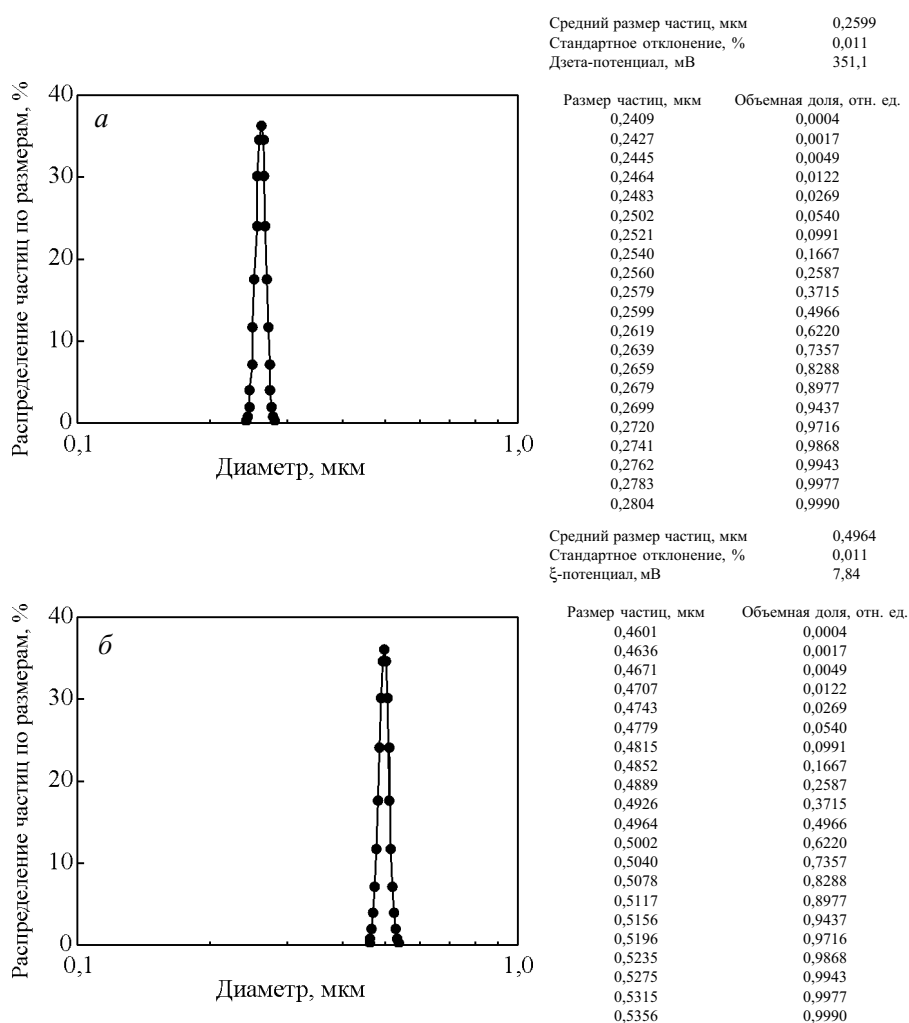


Рис. 1. Распределение частиц карбонатных осадков по размерам для прекурсора состава: а –  $80,4Y_2O_3 \cdot 19,6Yb_2O_3$ , б –  $75,5Y_2O_3 \cdot 19,6Yb_2O_3 \cdot 4,9HfO_2$ .

заряженных наночастиц, которое препятствует их агрегации и седиментации [3]. Электрический заряд коллоидной частицы складывается из суммы электрических зарядов потенциалопределяющих ионов и ионов адсорбционного слоя, образующих так называемый двойной электрический слой на поверхности частицы, определяющий ξ-потенциал системы.

Исследование процесса агрегации частиц карбонатных соединений и изменения ξ-потенциала дисперсной системы в течение времени выдерживания осадка в среде осаждения в сочетании с данными рентгенофазового (РФА) и рентгеноструктурного анализов может дать существенную информацию о механизмах формирования прекурсоров монодисперсных нанопорошков на основе допированного оксида иттрия.

На рис. 1 представлены кривые распределения частиц карбонатных осадков по размерам в первом

и втором экспериментах, характеризующиеся узким пиком распределения.

Изменение размеров частиц и ξ-потенциала исследованных дисперсных систем в процессе их старения в течение 60 и 90 ч представлены на рис. 2.

В первом эксперименте ξ-потенциал системы (280 – 380 мВ) был значительно выше, чем во втором (5 – 28 мВ) (рис. 2б, в), вследствие влияния нескольких факторов, а именно, содержания ПВП, вязкости дисперсионной среды, ионной силы раствора, размеров конгломератов частиц. Однако наиболее значимым фактором является концентрация поверхностно активного полимера в среде осаждения (0,75 масс. % ПВП в первом и 2,25 масс. % ПВП во втором эксперименте).

Влияние ПАВ и высокомолекулярных соединений (ВМС) на устойчивость дисперсных систем и, в частности, на агрегативную устойчивость кол-



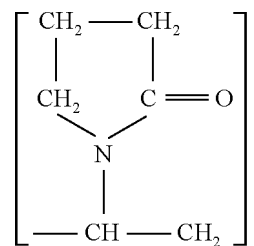
Рис. 2. Изменение размеров частиц осадка в первом (1) и втором (2) экспериментах (а) и  $\zeta$ -потенциала системы в первом (б) и во втором (в) экспериментах в процессе старения.

лоидного раствора определяется их способностью к адсорбции на поверхности частиц твердой фазы. Вследствие дифильности (то есть наличия полярной и неполярной частей в молекуле) и наличия диполей (положительного и отрицательного заряда) в молекуле ВМС молекулы стабилизатора ориентируются на границе раздела фаз таким образом, что своей полярной (или заряженной) частью они обращены к

полярной фазе (электролиту), а неполярной частью — к неполярной поверхности частиц, образуя на границе раздела фаз мономолекулярный слой. Вокруг этого слоя ориентируются молекулы воды, образуя гидратную оболочку. При этом снижаются силы поверхностного натяжения на границе раздела фаз, что приводит к повышению агрегативной устойчивости суспензии и стабилизации размера частиц.

Молекулы ПВП, относящиеся к водорастворимым полимерам линейного строения и проявляющие свойства неионогенного ПАВ, при введении в исследуемые дисперсные системы при растворении не ионизируются. На поверхности частицы карбонатного осадка адсорбируется только гидрофобная его часть, то есть углеводородная цепочка, а гидрофильная часть (полярная группа), смачиваемая водой, ориентируется в сторону молекул воды.

ПВП с молекулярной формулой



относится к поливиниламидам и благодаря наличию гетероцикла с атомом азота, входящим в состав амидной группировки, и функциональной группы ( $> \text{N} - \text{C} = \text{O}$ ) проявляет хорошие гидрофильные, адгезионные свойства и высокую склонность к комплексообразованию.

Осаждение катионов иттрия и иттербия из растворов нитратов гидрокарбонатом аммония в отсутствие ВМС зависит от водородного показателя среды осаждения и приводит к образованию слабоагломерированных наночастиц обычных двойных карбонатов  $(\text{Y}, \text{Yb})_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при  $\text{pH} \leq 6$ , либо многоуровневых жестких конгломератов двойных гидроксокарбонатов  $(\text{Y}, \text{Yb})(\text{OH})\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  при  $\text{pH} \geq 7$ , рентгенограммы и ИК-спектры которых приведены в [1].

В растворе ВМС контакт на стадии нуклеации структурного мотива “зародыша” карбонатного соединения иттрия и иттербия с ПВП приводит к появлению на ИК-спектрах высушенных продуктов осаждения характеристических полос поглощения, относящихся к иммобилизованному ПВП с максимумами в области частот  $\nu_1 = 1490$ ,  $\nu_2 = 1460$  и  $\nu_3 = 1670 \text{ см}^{-1}$ , характерных для колебаний пирролидоновых колец и функциональной группы  $\text{C} = \text{O}$  (рис. 3б). Наличие в ИК-спектре карбонатного соеди-

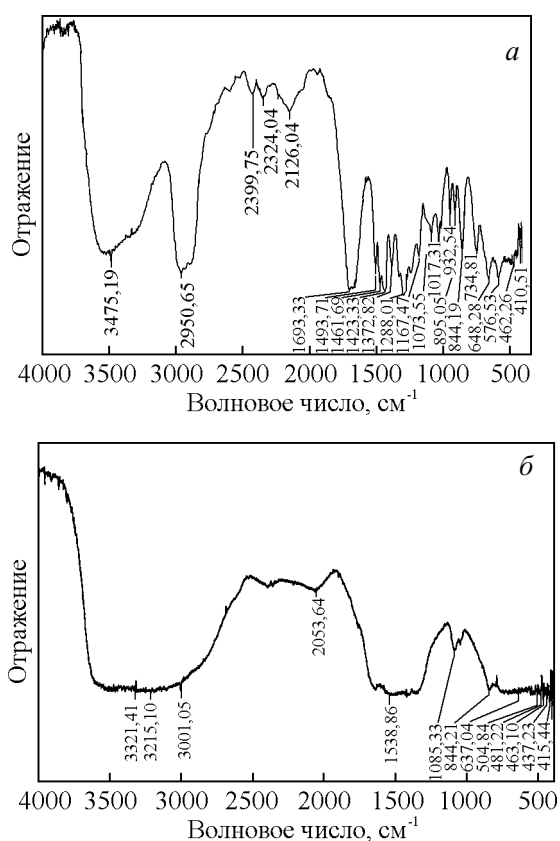


Рис. 3. ИК-спектры: *a* — поливинилпирролидона с  $M 58000$ ; *b* — карбонатного осадка с иммобилизованным ПВП.

нения после хемосорбции ПВП широкой полосы поглощения с максимумом в области частоты  $\nu = 3300 \text{ см}^{-1}$  (рис. 3б) является доказательством образования водородных связей между гидроксильными группами  $(\text{OH})^-$  и атомами азота и/или кислорода, закрепленного ПВП [4].

Приведенные факты свидетельствуют об образовании на поверхности наночастиц карбонатных осадков слоя адсорбированных молекул ПВП, экранирующего их от взаимодействия с гидроксильными группами. В исследованных условиях осаждения группы  $(\text{OH})^-$  взаимодействуют не с частицами выделяющихся карбонатов, а с адсорбированными на их поверхности молекулами ПВП. Указанные процессы носят конкурирующий характер, и уменьшение концентрации ПВП в среде осаждения ниже критического значения приводит к образованию гидрокарбонатов.

В целом, с ростом концентрации ПВП при сорбции молекул полимера поверхностный заряд выделяющейся частицы карбонатного осадка должен увеличиваться. Однако превышение некоторого концентрационного предела приводит к процессу флоку-

ляции (слипанию частиц дисперсной фазы), то есть агрегации частиц по “мостичному” механизму: сорбции одной молекулы полимера на 2-х или более частицах твердой фазы. Заряд системы может также снижаться при “капсулировании” частицы молекулами полимера, то есть полной изоляции их от ионов раствора электролита или среды осаждения [5].

Резкие колебания значений  $\xi$ -потенциала (в 1,5 – 2 раза) на стадии нуклеации и кристаллизации частиц карбонатных соединений свидетельствуют об изначальной неравновесности дисперсной системы (значительных колебаний концентрации частиц карбонатных соединений, ионов  $(\text{NH}_4)^+$  и молекул ПВП) в обоих экспериментах, что должно приводить к формированию осадков неравновесного состава. Однако в первом эксперименте  $\xi$ -потенциал системы в течение 3-х часов выдерживания осадка в среде осаждения (с концентрацией ПВП — 0,75 масс. %) восстановился до первоначального уровня  $\sim 350 \text{ мВ}$  и далее оставался почти неизменным (рис. 2б). Отмеченные особенности свидетельствуют о достаточно быстрых процессах формирования и упорядочения структуры карбонатного соединения в условиях проведения первого эксперимента при низких содержаниях ПВП в среде осаждения. По данным РФА полученное соединение относится к двойным гидрокарбонатам  $(Y,Yb)(\text{OH})(\text{CO}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  орторомбической симметрии [1]. По данным определения размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) размеры кристаллов двойных гидрокарбонатов, полученных в первом эксперименте, в процессе выдерживания осадка в среде осаждения в течение 60 часов изменялись незначительно в интервале 47 – 53 нм.

Во втором эксперименте восстановление  $\xi$ -потенциала было неполным и после 38 часов старения осадка значение  $\xi$ -потенциала резко понизилось. В условиях данного эксперимента продукт реакции выделяется в виде аморфного осадка. В течение первых суток выдерживания осадка в вязкой среде осаждения с повышенным содержанием ПВП (2,25 масс.%) РФА подтвердил аморфный характер его строения. Рентгенограмма полученного осадка аналогична рентгенограмме двойных карбонатов  $(Y,Yb)_2(\text{CO}_3)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  в аморфном состоянии [1]. Начало процесса кристаллизации осадка отмечается при его выдерживании в среде осаждения более 24 часов с образованием гидрокарбоната  $(Y,Yb)(\text{OH})(\text{CO}_3) \cdot n\text{H}_2\text{O}$  с размерами частиц 37 нм (по данным определения размера ОКР).

Следует отметить, что значительное отличие средних размеров частиц по данным определения ОКР и по данным электроакустического спектрального ана-

лиза объясняется образованием слабых конгломератов наночастиц карбонатных соединений по “мостичному” механизму сорбции одной молекулы ПВП на поверхности 2-х или более частиц твердой фазы. В процессе последующей термообработки прекурсора эти конгломераты разрушаются с образованием нанодispersных порошков кубических твердых растворов на основе оксида иттрия  $Y_{2-x}Yb_xO_3$ .

Значительные отличия в размерах конгломератов частиц в двух экспериментах, а именно ~260 нм в первом и ~500 нм во втором (рис. 2а), также связаны с проявлением поверхностно активных свойств ПВП, поскольку остальные параметры процесса осаждения были практически идентичны. Исключение составляет вязкость дисперсионной системы, значение которой в первом эксперименте составило  $2,9 \cdot 10^{-2}$  П, а во втором —  $5,3 \cdot 10^{-2}$  П, что объясняется повышенным содержанием ПВП во втором эксперименте и при заданных концентрациях реагентов (маточного раствора и осадителя) не столь существенно.

Сравнительно низкая концентрация ПВП в первом эксперименте не препятствовала быстрой кристаллизации наночастиц двойного гидроксиокарбоната в основном идиоморфной ромбической формы. Во втором эксперименте процесс кристаллизации был заторможен более чем на сутки из-за эффекта “капсулирования”, а частицы гидроксиокарбоната в дальнейшем кристаллизовались в псевдоморфной игольчатой форме, характерной для обычного карбоната иттрия.

Отмеченные морфологические особенности форм выделения и кристаллизации продуктов осаждения объясняются, по-видимому, образованием полимерных мостиков между частицами и их коагуляцией при избытке ПВП, в результате приводящей к уменьшению интенсивности диффузионного массопереноса как в объеме дисперсионной среды, так и на поверхности формирующихся частиц карбонатных соединений и в результате к противодействию их роста.

В условиях выполненных экспериментов процесс кристаллизации гидроксиокарбонатов с устойчивыми размерами частиц завершается примерно через 2,25 часа после образования осадка при содержании 0,75 масс. % ПВП в среде осаждения и через 38 часов старения осадка в среде осаждения при содержании 2,25 масс. % ПВП. Продукты осаждения в форме двойных гидроксиокарбонатов иттрия с иттербием представляют собой слабо агломерированные нанопорошки, конгломераты которых в первом эксперименте состоят примерно из 5 нанокристаллов двойной соли, а во втором — из 13 – 14 нанокристаллитов.

После термообработки полученных прекурсоров при температуре 1100°C были синтезированы нанопорошки кубических твердых растворов на основе допированного оксида иттрия заданных составов, близкие к монодисперсным, с размерами частиц ~ 37 – 38,5 нм в первом и ~ 31,5 нм во втором эксперименте.

Проведенные ранее исследования [6, 7] и разработанные методики синтеза нанопорошков заданной дисперсности и морфологии из карбонатных соединений позволили, в результате интенсификации процесса вакуумного спекания, получить прозрачную керамику на основе оксида иттрия состава  $Y_{1,61}Yb_{0,39}O_3$ .

### Заключение

Проведение комплекса сравнительных экспериментальных исследований особенностей формирования карбонатных соединений иттрия с иттербием при их осаждении гидрокарбонатом аммония из раствора азотнокислых солей в присутствии поверхностно активного ПВП, механизмов кристаллизации и агрегации наночастиц прекурсоров в низко-размерных вязких дисперсионных системах, а также зависимостей изменения  $\zeta$ -потенциала наносuspензий в процессе старения карбонатных осадков, позволило выявить условия и основные закономерности формирования двойного гидроксиокарбоната  $(Y, Yb)(OH)CO_3 \cdot nH_2O$  в растворах ПВП пограничных концентраций 0,75 до 2,25 масс.%. Разработаны методики синтеза двойных гидроксиокарбонатов иттрия с иттербием с частицами наноразмерного диапазона и с контролируруемыми морфологическими формами выделения, из которых после термообработки при 1100°C получены гомогенные, близкие к монодисперсным нанопорошки кубических твердых растворов на основе оксида иттрия заданных составов  $Y_{2-x}Yb_xO_3$ , а также содержащих добавку оксида гафния, с размерами частиц от 31 нм, используемых для получения прозрачной керамики на основе допированного оксида иттрия.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 10-08-01-192).*

### Литература

1. Тельнова Г.Б., Коновалов А.А., Шворнева Л.И., Аладьев Н.А., Поликанова А.С., Солнцев К.А. Исследование процессов соосаждения и формирования карбонатных соединений в нанотехнологии оптической

- лазерной керамики  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ . Перспективные материалы, 2008, №5, с. 31 – 40.
2. Dukhin A.S. and Goetz P.J. Ultrasound for Characterizing Colloids. Particle Sizing, Zeta Potential, Rheology. Elsevier, 2002, 372 p.
  3. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы. Учебное пособие под ред. акад. А.А. Ильина. М.: МГИУ, 2010, 230 с.
  4. Белякова Л.А., Варварин А.М. Хемосорбция N-винил-2-пирролидона на поверхности гидридкремнезема. Теорет. и экспер. химия, 1999, т. 35, № 4, с. 236 – 239.
  5. Гунько В.М., Зарко В.И., Туров В.В., Гончарук Е.В., Воронин Е.Ф., Казакова О.А. Водородные связи на границах раздела кремнезём – поливинилпирролидон – вода. Теоретическая и экспериментальная химия. 2001, т. 37, №2, с. 73 – 77.
  6. Коновалов А.А., Ситников А.И., Тельнова Г.Б., Солнцев К.А. Формирование гидроксокарбонатов иттрия и иттербия в дисперсных системах с растворами высокомолекулярных соединений. Труды второго международного междисциплинарного симпозиума “Физика низкоразмерных систем и поверхностей” Low Dimensional Systems (LDS-2), г. Ростов-на-Дону – п. Лоо, 3 – 8 сентября 2010 г., Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2010, с. 259 – 262.
  7. Тельнова Г.Б., Коновалов А.А., Шворнева Л.И., Куцев С.В., Солнцев К.А. Фазовые превращения при синтезе и спекании нанопорошков  $\text{Y}_{2-x}\text{Yb}_x\text{O}_3$ . Неорганические материалы. 2011, т. 47, № 4, с. 1 – 7.

**Тельнова Галина Борисовна** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Специалист в области неорганической химии и материаловедения. E-mail: [gtelnova@mail.ru](mailto:gtelnova@mail.ru).

**Коновалов Анатолий Анатольевич** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, младший научный сотрудник. Специалист в области неорганической химии и материаловедения. E-mail: [AK357@rambler.ru](mailto:AK357@rambler.ru).

**Ситников Алексей Игоревич** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, старший научный сотрудник. Специалист в области неорганической химии и материаловедения. E-mail: [alexei.sitnikov@gmail.com](mailto:alexei.sitnikov@gmail.com).

**Солнцев Константин Александрович** — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, академик, директор, заведующий лабораторией. Ведущий специалист в области материаловедения.