

УДК 666.1.002.34/35

ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ НАНОКОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОСИЛОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ ХРОМА, ВАНАДИЯ И ФОСФОРА

Е. Н. ПОДДЕНЕЖНЫЙ, А. А. БОЙКО, О. А. СТОЦКАЯ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

В. М. БОГАТЫРЕВ, Н. В. БОРИСЕНКО

Институт химии поверхности НАН Украины, г. Киев

Введение

Одной из проблем золь-гель синтеза оптических сред, содержащих два или более легирующих компонентов, является нежелательное взаимодействие легирующих ионов между собой и с гелеобразующими агентами, что приводит в ряде случаев к выпадению осадков в коллоидной системе и кристаллизации аморфной матрицы. Целью настоящей работы являлась разработка нового варианта золь-гель синтеза функциональных материалов на основе коллоидных форм кремнезема с использованием в качестве наполнителей и одновременно легирующих компонентов пирогенных кремнеземов (аэросилов). На их поверхность методом химического газофазного осаждения нанесены наноразмерные частицы оксидов переходных и редкоземельных элементов, которые в конечном продукте служат оптически активными центрами, равномерно распределенными по объему образца [1]. Применение модифицированных аэросилов в схемах низкотемпературного золь-гель синтеза кварцевого стекла и нанокomпозитов позволяет осуществлять одновременное легирование двумя и тремя ионами переходных и редкоземельных элементов, а также облегчает встраивание частиц в сетку геля, повышает однородность гель-стекла, уменьшает степень его гидратации.

В настоящей работе были использованы аэросилы, модифицированные оксидами ванадия, хрома и фосфора. Исследование физико-химических основ синтеза функциональных материалов, содержащих вышеуказанные легирующие компоненты, представляет также большой практический интерес, поскольку пространственно организованные наноразмерные структуры оксидов ванадия и хрома, расположенные в порах упорядоченных оксидных матриц, обеспечивают уникальный комплекс их оптических характеристик и физико-химических свойств [2], [3].

Экспериментальная часть

Для оптимизации процесса золь-гель синтеза стеклообразных материалов, содержащих модифицированные аэросилы, были проведены реологические исследования композиционных коллоидов на основе гидролизата ТЭОС, пирогенного кремнезема А-380 и модифицированных аэросилов с помощью ротационного вискозиметра «Rheotest 2.1» (Германия) с использованием цилиндрической системы в диапазоне скоростей сдвига от 9 до 1320,0 с⁻¹. Результаты реологических измерений обрабатывали на компьютере с помощью программ «Excel» и «Origin 6.0». В исследованиях использовали высокодисперсный кремнезем А-380 с удельной поверхностью

$\approx 380 \pm 40$ м²/г и распределением первичных частиц по размерам 5–15 нм. Состав и свойства модифицированных аэросилов приведен в табл. 1.

Золи готовили смешиванием гидролизата ТЭОС, получаемого при интенсивном перемешивании ТЭОС в присутствии 0,01 н НСl в качестве катализатора, и водной дисперсией аэросилов – А-380 и модифицированного ионами фосфора, ванадия и хрома. Полученный золь подвергали диспергированию при интенсивном механическом перемешивании с УЗ-активацией.

Таблица 1

Состав модифицированных аэросилов

Состав модифицированного аэросила	Концентрация модифицирующего элемента, мас. %	Структура модифицирующей фазы
Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	1,0 (Cr)	α-Cr ₂ O ₃
P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /SiO ₂	1,04(P) / 2,88 (V)	рентгеноаморфная, только фаза Cr ₂ O ₃
P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	1,04 (P) / 2,88 (V) / 2,73 (Cr)	рентгеноаморфная

Для получения стеклообразных образцов проводили нейтрализацию зольных растворами 0,1н NH₄OH (серия I) и смеси 0,1 н NH₄OH и 2 % NH₄F (серия II) до рН = 5,5–6,5. Золи выливали в литые формы для гелеобразования. Созревание гелей проводили в синерезисной жидкости при комнатной температуре. В качестве заливочной среды использовали бидистиллированную воду. Сушку формованных гелей проводили в сушильном шкафу при температуре 30 °С непосредственно в литых формах. Ксерогели спекали в муфельной печи на воздухе при температурах 600, 1000, 1100 и 1200 °С (скорость подъема 200 °С/час) в течение 30 мин.

Результаты и их обсуждение

Проведены исследования зависимости динамической вязкости композиционных зольных систем от состава, рН, концентрации аэросилов, скорости сдвига, напряжения сдвига. Исследована временная устойчивость зольных систем, а также процессы их гелирования в зависимости от концентрации аэросилов и рН. Состав и рН исследованных зольных систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Состав и рН исследованных зольных систем

Состав коллоидной системы	Содержание SiO ₂ в золе, г/100 мл	Содержание аэросила А-380 в золе, г/100 мл	Содержание модифицированного аэросила в золе, г/100 мл	рН золя
Гидролизат ТЭОС Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	10; 13	–	7,0	2,8
Гидролизат ТЭОС P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /SiO ₂	10; 13	–	7,0	2,6
Гидролизат ТЭОС P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	10; 13	–	7,0	2,7
Гидролизат ТЭОС А-380 Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	10; 13	4,3; 8,2	0,8	2,9

Состав коллоидной системы	Содержание SiO ₂ в золе, г/100 мл	Содержание аэросила А-380 в золе, г/100 мл	Содержание модифицированного аэросила в золе, г/100 мл	рН золя
Гидролизат ТЭОС А-380 P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /SiO ₂	10; 13	4,3; 8,2	0,8	2,6
Гидролизат ТЭОС А-380 P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	10; 13	4,3; 8,2	0,8;	2,7

Установлено, что при одинаковой концентрации SiO₂ в золе наибольшую вязкость имеют коллоидные системы с аэросилом, поверхность которого модифицирована наночастицами оксида хрома (III) и соединениями ванадия (V) и фосфора (V) (рис. 1, а, кривая 2). Золи с аэросилом, модифицированным соединениями ванадия и фосфора демонстрируют зависимость, подобную системам на основе гидролизата ТЭОС и А-380 (кривая 4). Различие в характере реологических кривых можно объяснить тем, что в зависимости от химической природы соединения, модифицирующего поверхность кремнезема, изменяется характер структурообразования, что наиболее отчетливо проявляется в системе «гидролизат ТЭОС – модифицированный аэросил». Эти выводы подтверждает зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига для золя состава «гидролизат ТЭОС – А-380 – А-Сг», представляющая собой петлю гистерезиса (рис. 1, б). Тиксотропные свойства у золь, содержащих модифицированные аэросилы, выражены слабо, особенно у концентрированных золь, в которых процесс гелеобразования при старении системы во времени протекает необратимо.

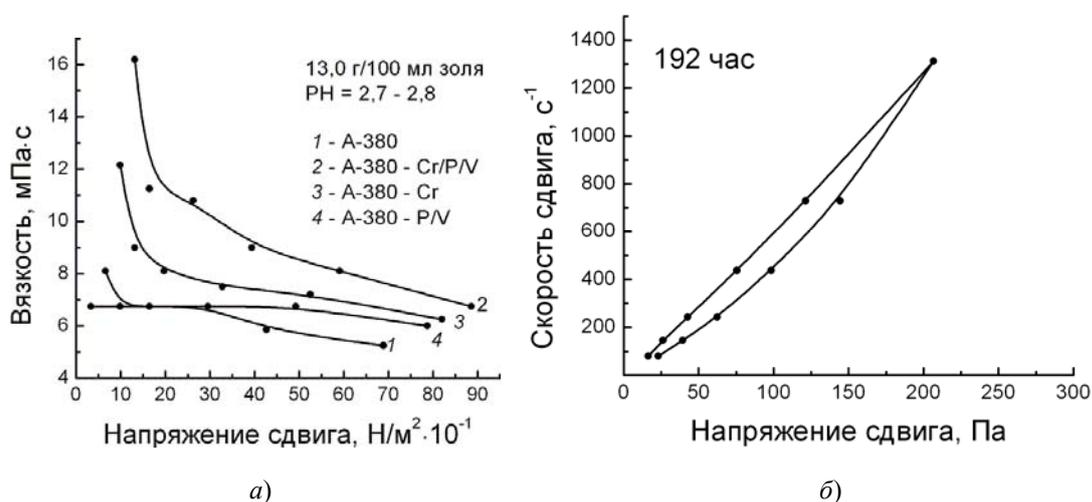


Рис. 1. Зависимость вязкости (а) и скорости сдвига (б) от напряжения сдвига для золь с модифицированными аэросилами

Проведена оценка кинетики гелеобразования по изменению динамической вязкости исследованных коллоидных систем при определенной скорости сдвига. При введении в исследуемые золи аммиачного раствора процесс агломерации коллоидных частиц ускоряется и время гелеобразования уменьшается. Установлено, что с увеличением концентрации аэросила в системе «гидролизат ТЭОС – А-380 – модифицированный аэросил» от 7 до 17 г/100 мл золя в интервале рН 6,0–6,5 время гелеобразования сокращается почти вдвое и составляет порядка 5–10 мин. На основании

реологических исследований определены оптимальное общее содержание SiO₂ в золе, составляющее 17,5 г/100 мл (при массовом соотношении SiO₂ в гидролизате ТЭОС и в аэросилах 1:1,5), оптимальный pH гелеобразования, равный 5,5–6 при времени гелеобразования 15–20 мин.

С использованием аэросилов, модифицированных оксидами фосфора (V), ванадия (V) и хрома (III), синтезированы гель-стекла и нанокомпозиты составов SiO₂–P₂O₅, SiO₂–P₂O₅–V₂O₅ и SiO₂–P₂O₅–V₂O₅–Cr₂O₃. Состав исследованных образцов и режимы их термообработки приведены в табл. 3.

Гели, формируемые из ТЭОСа и аэросилов, содержат значительное количество как свободной, так и связанной воды в виде адсорбированных и водородно-связанных молекул, а также гидроксидных групп OH⁻. Для анализа структуры формируемых в коллоидно-кремнеземной системе гелей и композитов, а также определения содержания в них гидроксидных групп использовали ИК-спектроскопию (ThermoNicolet FTIR Spectrometer в диапазоне частот 4000–400 см⁻¹).

Таблица 3.3

Состав и режимы термообработки образцов ксерогелей

Тип модифицированного аэросила	Концентрация модифицирующей фазы, мас. %	Гелеобразователь	Режимы термообработки ксерогелей, °С
P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /Cr ₂ O ₃ /SiO ₂	1,04 (P) / 2,88 (V) / 2,73 (Cr)	1) 0,1 н NH ₄ OH 2) 0,1 н NH ₄ OH и 2 % NH ₄ F	30, 600, 1000, 1200
P ₂ O ₅ /V ₂ O ₅ /SiO ₂	1,04 (P) / 5,3 9(V)	1) 0,1 н NH ₄ OH 2) 0,1 н NH ₄ OH и 2 % NH ₄ F	30, 600, 1000, 1200
P ₂ O ₅ /SiO ₂	1,1 (P)	0,1 н NH ₄ OH	30, 600, 1000, 1100, 1200
P ₂ O ₅ /SiO ₂	2,2 (P)	0,1 н NH ₄ OH	30, 600, 1000, 1100, 1200
P ₂ O ₅ /SiO ₂	3,6 (P)	0,1 н NH ₄ OH	30, 600, 1000, 1100, 1200
P ₂ O ₅ /SiO ₂	4,5 (P)	0,1 н NH ₄ OH	30, 600, 1000, 1100, 1200
V ₂ O ₅ /SiO ₂	1,1 (V)	0,1 н NH ₄ OH	30, 600, 1000, 1100, 1200
SiO ₂	–	0,1 н NH ₄ OH	30, 600, 1000, 1100, 1200

На рис. 2 приведены ИК-спектры пропускания ксерогелей матрицы SiO₂ (а) и ксерогеля с фосфорсодержащим аэросилом состава P₂O₅/SiO₂ (б), при различных температурах обработки. ИК-спектры для ксерогелей, содержащих аэросилы V₂O₅/SiO₂, P₂O₅/V₂O₅/SiO₂ и P₂O₅/V₂O₅/Cr₂O₃/SiO₂ практически идентичны, т. е. тип модифицированного аэросила не влияет на характер формирования внутренней структуры силикатной матрицы.

В диапазоне волновых чисел 500–1200 см⁻¹ присутствует три максимума, отвечающие колебаниям связей Si–O–Si в тетраэдре SiO₄: два небольших минимума в диапазоне 500 и 790–850 см⁻¹ и один интенсивный в диапазоне 1040–1100 см⁻¹. В диапазоне 1200–4000 см⁻¹ присутствуют два небольших пика в диапазонах 1600–1640 см⁻¹ и 2340–2370 см⁻¹ и один значительный в диапазоне 3360–3500 см⁻¹, которые соответствуют колебаниям гидроксидных групп. Однако полоса 3750 см⁻¹, характерная для свободных силанолов ≡Si–OH, обнаруживается только в случае образцов, термообработанных при температурах выше 600 °С.

В спектрах ксерогелей, термообработанных при 30 °С, полоса, соответствующая свободным силанолам, не обнаруживается из-за наложения как вицинальных силанолов, так и, возможно, молекулярно-адсорбированной воды. Поскольку содержание модифицирующих фаз в ксерогелях невелико, в спектрах отсутствуют соответствующие им полосы поглощения (3670 см^{-1} – связь P–OH, 2490 см^{-1} – связь P–H, 1380 см^{-1} – связь P=O).

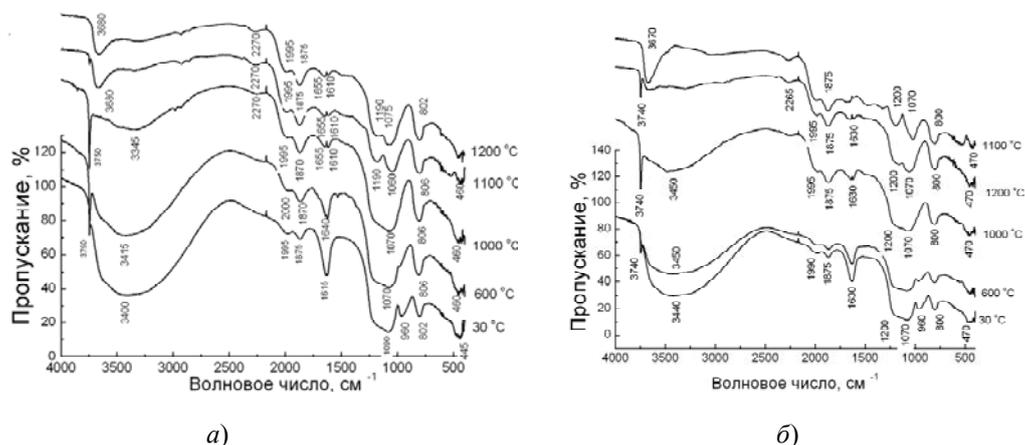


Рис. 2. ИК-спектры образцов ксерогеля SiO_2 (а) и ксерогеля с аэросилом $\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ (б) при различных температурах обработки

С повышением температуры спекания для всех образцов ксерогелей наблюдается общая тенденция в уменьшении полосы поглощения $3360\text{--}3500\text{ см}^{-1}$, соответствующей колебаниям гидроксидных групп. Расчет суммарной концентрации НОН и ОН⁻ проводили на основании ИК-спектров в соответствии с формулой [4]:

$$[\text{ОН}^-](10^{-4}\text{ мас. \%}) = (1000/t) \lg(T_a/T_b),$$

где t – толщина образца, мм; T_a – оптическое пропускание при $\nu = 3800\text{ см}^{-1}$; T_b – оптическое пропускание при $\nu = 3600\text{ см}^{-1}$. Однако для гидратированных ксерогелей, ввиду наложения нескольких частот колебаний и уширения пика поглощения точный расчет провести не представляется возможным.

Установлена зависимость концентрации гидроксидных групп в ксерогелях и стеклообразных образцах от природы и содержания модифицирующей фазы аэросилов (рис. 3). Анализ полученных результатов показывает, что наименьшее содержание гидроксидных групп получено для образцов ксерогелей с фосфор- и ванадийсодержащими аэросиломи, причем существует оптимальное значение концентрации модифицирующей фазы. Так, введение фосфорсодержащих аэросилов с содержанием фосфора более 2 % (кривые 5, 6, 7 на рис. 3) приводит к возрастанию содержания гидроксидных групп в образцах термообработанных при $1000\text{--}1200\text{ °C}$, причем в спектрах наблюдается появление полосы в диапазоне 3750 см^{-1} , соответствующей силанольным группам (Si–OH). Ксерогели, не содержащие модифицированные фосфором и ванадием аэросилы, при температуре 1200 °C вспенились.

Дегидроксилирующее действие аэросилов, модифицированных оксидами фосфора и ванадия, можно объяснить на основе представлений о существовании на поверхности кремнезема фосфороксидных структур различного строения, включающих силикофосфатные группы SiOP, адсорбционные комплексы кислот фосфора, ассоциаты кислот фосфора и конденсированные структуры с группами POP [5]. Наблюдающееся снижение концентрации гидроксидных групп в процессе спекания ксерогелей может быть объяснено конденсационными процессами между гидроксидными группами у атомов фосфора и кремния с образованием групп POP, SiOP и выделением молекул воды по схеме [6]:

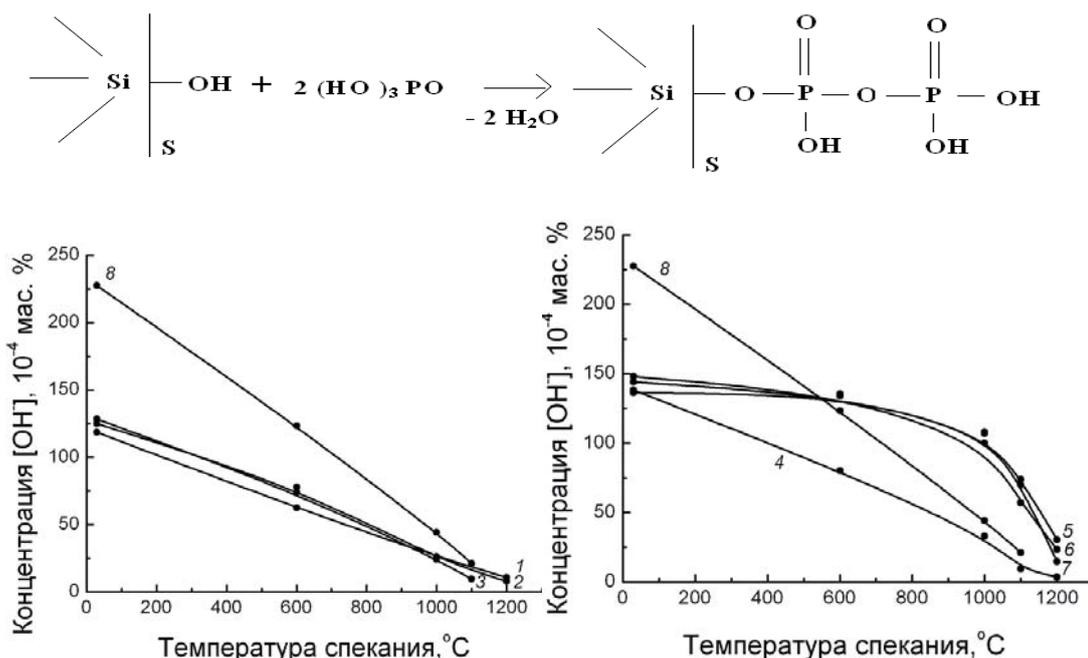


Рис. 3. Зависимость концентрации гидроксидных групп от температуры спекания ксерогелей различных составов:

1 – $\text{P}_2\text{O}_5/\text{V}_2\text{O}_5/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$; 2 – $\text{P}_2\text{O}_5/\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$; 3 – $\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$; 4 – $\text{P}_2\text{O}_5(1,1\%) / \text{SiO}_2$;
 5 – $\text{P}_2\text{O}_5(2,2\%) / \text{SiO}_2$; 6 – $\text{P}_2\text{O}_5(3,6\%) / \text{SiO}_2$; 7 – $\text{P}_2\text{O}_5(4,5\%) / \text{SiO}_2$; 8 – SiO_2

Отличие хода кривых 5, 6, 7 на рис. 3, соответствующих образцам ксерогелей с аэросилами, модифицированными оксидом фосфора с содержанием фосфора 2,2 %, 3,6 % и 4,5 % соответственно от аналогичных зависимостей (кривые 1, 2, 3, 4, 8), можно объяснить повышенной сорбцией паров воды за счет более высокого содержания фосфороксидных структур на поверхности кремнезема. В данном случае условия обработки ксерогелей (скорость подъема температуры и время спекания) не позволяют воде, связанной в адсорбционные комплексы и ассоциаты кислот фосфора, покинуть поровое пространство до момента схлопывания пор, что объясняет несколько более высокие значения концентраций гидроксидных групп для этой серии образцов.

Удельную поверхность образцов, обработанных в интервале температур от 30 до 1200 °С, определяли по методу низкотемпературной адсорбции азота. Результаты измерений представлены на рис. 4.

Серия образцов ксерогелей, содержащих аэросил $\text{P}_2\text{O}_5/\text{V}_2\text{O}_5/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, для гелеобразования которых использовали смесь 0,1 н NH_4OH и 2 % NH_4F (кривая 1), имеет меньшие значения удельной поверхности, чем ксерогели, содержащие аэросил $\text{P}_2\text{O}_5/\text{V}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$, для гелеобразования которых использовали 0,1 н NH_4OH (кривая 2).

Следует отметить тот факт, что ксерогели, содержащие модифицированные аэросилы, имеют высокие значения удельной поверхности, составляющие от 390 до 520 $\text{m}^2/\text{г}$ по сравнению с чистыми ксерогельными матрицами, имеющими удельную поверхность порядка 250–300 $\text{m}^2/\text{г}$. Можно предположить, что в полидисперсной системе композиционного золя при формировании геля наличие остатков фосфористой кислоты и ванадиевых кислот, находящихся на поверхности частиц модифицированного кремнезема, приводит к формированию рыхлых и разветвленных структур с большим количеством внутренних связей, что согласуется с результатами реологических исследований композиционных зелей, содержащих модифицированные аэросилы.

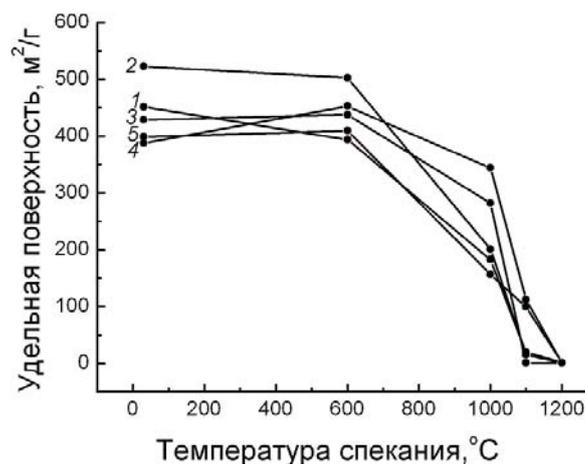


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности ксерогелей различного состава от температуры спекания:

1 – $P_2O_5/V_2O_5/Cr_2O_3/SiO_2$; 2 – $P_2O_5/V_2O_5/SiO_2$; 3 – $P_2O_5(2,2\%)/SiO_2$; 4 – $P_2O_5(3,6\%)/SiO_2$;
5 – $P_2O_5(4,5\%)/SiO_2$

В процессе спекания с повышением температуры удельная поверхность ксерогелей убывает, причем резкое снижение происходит в интервале температур 800–1200 °C, когда процесс уплотнения пористой структуры происходит за счет спекания по механизму вязкого течения. В интервале температур 60–600 °C изменение удельной поверхности незначительно и происходит, в основном, за счет механизма поликонденсации структурных единиц кремнегеля. При температуре 1200 °C ксерогели полностью спекаются до монолитного беспористого состояния.

В сформированных гелях поры полностью заполнены жидкостью, в состав которой входят вода, ионы H^+ , NH_4^+ , остатки этанола и десорбированных с поверхности ванадиевых и фосфорных кислот. В процессе высушивания гелей при нагревании до 150–180 °C происходит удаление физически сорбированной воды, разрушение большого количества водородных связей с поверхностными соединениями модифицированного кремнезема. Поры полностью освобождаются от свободной воды, а оставшиеся молекулы воды H_2O связаны с силанольными группами $Si-OH$ и остатками фосфорных и ванадиевых кислот водородными связями. Представление о реальном состоянии поверхности фосфорсодержащего кремнезема в виде производных гидратированных кислот фосфора предполагает, что термическая обработка, вызывающая удаление физически сорбированной воды, приводит к повышению концентрации фосфорных кислот в гидратной оболочке кремнеземной частицы.

Далее с повышением температуры возможно протекание процессов термической дегидратации и пиролиза остатков фосфорной кислоты H_3PO_4 , а при высоких концентрациях модифицирующей фазы на поверхности кремнезема – конденсационных с образованием полифосфорных кислот (200–300 °C) и их последующим пиролизом.

При нагревании до 300 °C происходит удаление воды, сорбированной на поверхности кремнезема и выделяющейся в процессе конденсации. При этом образуются поверхностные полигидрофосфорильные структуры с элементарным звеном $-ORH(O)-$ и группы $SiOP$. Протекание этих конденсационных процессов сопровождается деформацией поверхностных полислоистых кластеров при миграции атомов фосфора с образованием связей $Si-O-P$ [5].

В температурном интервале 600–800 °C происходит удаление остаточной органики и водородно-связанной воды, после чего поры уменьшаются в диаметре за счет

уплотнения структуры ксерогелей. Модифицирующие соединения находятся в виде разных форм оксидов фосфора P_2O_5 и ванадия V_2O_5 , VO_2 .

На заключительном этапе, в высокотемпературном интервале, структура геля уплотняется. За счет вязкого течения силикатной трехмерной аморфной сетки происходит схлопывание пор. До момента схлопывания пор возможно незначительное выделение летучих форм оксидов ванадия и фосфора.

Таким образом можно констатировать, что при введении модифицированных оксидами фосфора и ванадия аэросилов в структуру геля с последующей термообработкой происходит дегидроксилирование пористой поверхности кремнекислородного каркаса за счет конденсационных процессов между гидроксидами фосфора, ванадия и кремния с образованием групп PO_2 , $SiOP$ ($SiOV$) и выделением молекул воды. Использование аэросилов, модифицированных оксидами фосфора, эффективно снижает концентрацию гидроксидных групп в стекле до $3,5 \cdot 10^{-4}$ мас. % (3,5 ppm). Кроме того, данный метод лишен недостатков традиционных методов дегидратации и дегидроксилирования стеклообразных материалов с использованием фторсодержащих и хлорсодержащих реагентов.

Спектр люминесценции нанокompозита состава $SiO_2-Cr_2O_3-V_2O_5-P_2O_5$ приведен на рис. 5 в сравнении со спектром люминесценции кварцевого стекла, легированного ионами хрома (III) с помощью солей.

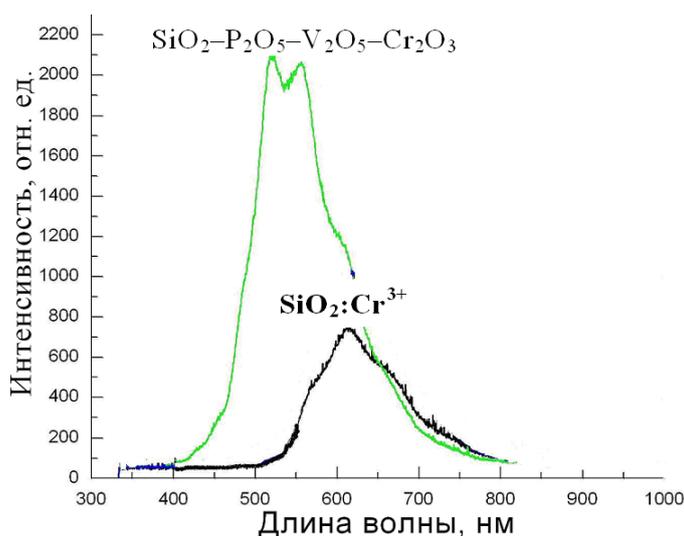


Рис. 5. Спектры люминесценции нанокompозита $SiO_2-P_2O_5-V_2O_5-Cr_2O_3$ и геля-стекла $SiO_2:Cr^{3+}$

Анализ спектров показывает, что введение в состав силикатной матрицы оксидов фосфора и ванадия приводит к сдвигу полосы люминесценции хрома (550–700 нм) в диапазон 450–600 нм. Таким образом, применение в качестве легирующих компонентов аэросилов, модифицированных группами оксидов различных элементов, позволяет влиять не только на интенсивность люминесценции оптически активного иона, но и на спектральное положение полосы люминесценции а, следовательно, дает возможность изменять его оптические свойства.

Спектрально-люминесцентные свойства синтезированных стекол делают возможным их применение в качестве высокоэффективных люминесцентных материалов зеленой области спектра.

Заключение

Введение в систему «гидролизат ТЭОС – А-380» аэросилов, модифицированных оксидами хрома, ванадия и фосфора, приводит к возрастанию вязкости золь и изменению характера реологических зависимостей, что объясняется влиянием химической природы соединений, модифицирующих поверхность кремнезема, и проявляется в характере структурообразования многокомпонентной коллоидной системы. Определены условия формирования золь, пригодных для золь-гель синтеза функциональных материалов: оптимальное общее содержание SiO_2 в золе, составляет 17,5 г/100 мл (при массовом соотношении SiO_2 в гидролизате ТЭОС и в аэросилах 1 : 1,5, соотношение чистого аэросила и модифицированного составляет 22 : 1), оптимальный рН гелеобразования, равен 5,5–6 единиц при времени гелеобразования 15–20 мин.

С использованием модифицированных аэросилов синтезированы гель-стекла состава $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$, $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-V}_2\text{O}_5$ и $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-V}_2\text{O}_5\text{-Cr}_2\text{O}_3$. Обнаружено дегидроксидирующее влияние аэросилов, модифицированных оксидами фосфора и ванадия. С помощью ИК-спектроскопии установлена зависимость концентрации гидроксидных групп в гелях и стеклообразных образцах от природы и содержания модифицированных аэросилов. Наименьшее содержание гидроксидных групп получено для образцов ксерогелей с модифицированным аэросилом с содержанием фосфора 1,1 мас. %. Наблюдающееся снижение концентрации гидроксидных групп в процессе спекания ксерогелей объясняется конденсационными процессами между гидроксидными группами у атомов фосфора и кремния с образованием групп PO_2 , SiOP и выделением молекул воды.

Анализ спектров люминесценции нанокompозита состава $\text{SiO}_2\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5\text{-P}_2\text{O}_5$, показал, что введение в состав силикатной матрицы оксидов фосфора и ванадия приводит к сдвигу полосы люминесценции хрома (550–700 нм) в диапазон 450–600 нм. Показано, что применение в качестве легирующих компонентов аэросилов, модифицированных группами оксидов различных элементов, позволяет влиять не только на интенсивность люминесценции оптически активного иона, но и на спектральное положение полосы люминесценции.

Литература

1. Золь-гель синтез хромсодержащих функциональных материалов / Е. Н. Поддешный [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2002. – № 2. – С. 11–18.
2. Ghosh, A. Electrical conduction in some sol-gel silicate glasses / A. Ghosh, D. Chakravorty // J. Physical Review. – 1993. – Vol. 48(8). – P. 5167–5171.
3. Vanadium oxide nanofibers by electrospinning / H.Y.Kim [et al.] // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2003. – Vol. 5. – P. 216–219.
4. Pope, E. J. Nd-Doped Silica Glass I: Structural Evolution in the Sol-Gel State / E. J. Pope, J. D. Mackenzie // J. Non-Cryst. Sol. – 1988. – Vol. 106. – P. 236–241.
5. Богатырев, В. М. Химические и термические превращения поверхностных структур фосфорсодержащего дисперсного кремнезема / В. М. Богатырев, А. А. Чуйко // Химия поверхности кремнезема. В 2 ч. Ч. 2. – Киев : Ин-т химии поверхности НАН Украины. – 2001. – С. 447–486.
6. Богатирьев, В. М. Мас-спектрометричне дослідження термічних перетворень гідрофосфорильних груп на поверхні пірогенного кремнезему / В. М. Богатирьев, В. А. Покровський, О. О. Чуйко // Докл. АН Украины. – 1994. – № 5. – С. 140–142.