

Научная статья

УДК 546.05:539.23

doi: 10.17223/24135542/27/3

Золь-гель метод получения тонкопленочных оксидных материалов различного назначения: обзор результатов исследований на кафедре неорганической химии Томского государственного университета

**Светлана Анатольевна Кузнецова¹, Ольга Сергеевна Халипова²,
Екатерина Сергеевна Лютова³, Людмила Павловна Борило⁴**

*1, 2, 3, 4 Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия*

¹ onm@mail.tsu.ru

² Chalipova@mail.ru

³ lyutova.tsu@mail.ru

⁴ borilo@mail.ru

Аннотация. Золь-гель метод получения тонкопленочных оксидных материалов хорошо зарекомендовал себя как недорогой и достаточно гибкий в исполнении способ получения наноструктур. Этот метод позволяет достигать равномерного распределения элементов многокомпонентных систем по поверхности различных твердых тел. Известно, что толщина и морфология поверхности оксидных пленок во многом определяется составом, строением и процессами, протекающими в золях, из которых они получены. Важной особенностью этого метода является и выбор прекурсоров для получения желаемых композиционных оксидных материалов. В данной работе мы представляем обзор результатов исследований получения тонкопленочных оксидных материалов на основе $\text{SiO}_2\text{--}\text{Э}_x\text{O}_y$ (Э – редкоземельные элементы, Sn, Mn, Co, Ni, Ca, P), $\text{TiO}_2\text{--}\text{Э}_x\text{O}_y$ (Э – Si, Sn, Co, Ni), $\text{SnO}_2\text{--}\text{Э}_x\text{O}_y$ (Э – In, Sb, Ce) и ZrO_2 золь-гель методом коллектива кафедры неорганической химии Томского государственного университета за 1986–2021 гг. В основной части работы рассмотрены золь-гель процессы (гидролиз, поликонденсация, комплексообразование) с участием тетраэтоксисилана, тетрабутоксититана, ацетилацетонатных комплексов сурьмы(III) и олова(II, IV), а также полиядерных кластеров циркония(IV). Обсуждаются процессы получения золя, приводящие к его пленкообразующей способности, состав мицелл, размер коллоидных частиц, изменение состава мицелл при внесении добавки в состав золя на основе тетраэтоксисилана. Показано влияние добавки солей различной природы, органических лигандов, растворителей на временную устойчивость золь. Анализируется влияние гидролизующей способности двухзарядных катионов никеля, марганца и кобальта на скорость гидролиза и поликонденсации тетраэтоксисилана. На основании проведенных исследований представлена обобщенная технологическая схема приготовления устойчивых для пленкообразования золь на примере золь тетраэтоксисилана и тетрабутоксититана. Рассматривается связь между сетчатой структурой золя на основе тетраэтоксисилана и сетчатой структурой оксидных пленок на примере $\text{SiO}_2\text{--}\text{CeO}_2$, $\text{SiO}_2\text{--}\text{NiO}$, $\text{SiO}_2\text{--}\text{Mn}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{--}\text{Co}_3\text{O}_4$. Показано влияние скорости температурной обработки гелей на морфологию оксидных пленок.

Ключевые слова: золь-гель метод, пленкообразующая способность, оксидные пленки, процессы получения золя, морфология пленок

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), проект № 2.4.1.22 ЛМУ.

Для цитирования: Кузнецова С.А., Халипова О.С., Лютова Е.С., Борило Л.П. Золь-гель метод получения тонкопленочных оксидных материалов различного назначения: обзор результатов исследований на кафедре неорганической химии Томского государственного университета // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2022. № 27. С. 39–53. doi: 10.17223/24135542/27/3

Original article

doi: 10.17223/24135542/27/3

Sol-gel method for obtaining oxide thin-film materials for various purposes: a review of research results at the Department of Inorganic Chemistry of Tomsk State University

**Svetlana A. Kuznetsova¹, Olga S. Khalipova²,
Ekaterina S. Lyutova³, Lyudmila P. Borilo⁴**

^{1, 2, 3, 4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ onm@mail.tsu.ru

² Chalipova@mail.ru

³ lyutova.tsu@mail.ru

⁴ borilo@mail.ru

Abstract. The sol-gel method of obtaining thin-film oxide materials has proven to be an inexpensive and sufficiently flexible method of obtaining nanostructures. This method makes it possible to achieve uniform distribution of elements of multicomponent systems on the surface of various solids. It is known that the thickness and surface morphology of oxide films is largely determined by the composition, structure, and processes occurring in the sols from which they are obtained. An important feature of this method is also the choice of precursors for obtaining the desired composite oxide materials. In this paper we present a review of the results of studies on preparation of thin-film oxide materials based on $\text{SiO}_2\text{-E}_x\text{O}_y$ (E – rare earth elements (REE), Sn, Mn, Co, Ni, Ca, P), $\text{TiO}_2\text{-E}_x\text{O}_y$ (E – Si, Sn, Co, Ni), $\text{SnO}_2\text{-E}_x\text{O}_y$ (E – In, Sb, Ce) and ZrO_2 by sol-gel method by the team of the Department of Inorganic Chemistry of Tomsk State University during the period from 1986 till 2021. In the main part of the paper we consider sol-gel processes (hydrolysis, polycondensation, complexation) involving tetraethoxysilane, tetrabutoxytitanium and, acetylacetonate complexes of antimony(III) and tin(II,IV) as well as polynuclear zirconium(IV) clusters. We discuss the processes of sol production leading to its film-forming ability, micelle composition, colloidal particle size, and changes in micelle composition upon addition of tetraethoxysilane-based sol. We show the effect of the addition of salts of different nature, organic ligands, and solvents on the temporal stability of the sols. We discuss the effect of the hydrolyzing ability of the double-charged cations of nickel, manganese, and cobalt on the rate of

hydrolysis and polycondensation of tetraethoxysilane. Based on the above studies, we present a generalized technological scheme for the preparation of film-stable sols by the example of tetraethoxysilane and tetrabutoxytitaniumsols. We consider the relationship between the mesh structure of tetraethoxysilane sol and the mesh structure of oxide films by the example of $\text{SiO}_2\text{-CeO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-NiO}$, $\text{SiO}_2\text{-Mn}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4$. We show the effect of the rate of temperature treatment of gels on the morphology of oxide films.

Keywords: sol-gel method, film-forming ability, oxide films, processes of sol production, film morphology

Acknowledgments: The study was supported by the Development Program of Tomsk State University (Priority-2030), project No. 2.4.1.22 LMU.

For citation: Kuznetsova, S.A., Khalipova, O.S., Lyutova, E.S., Borilo, L.P. Sol-gel method for obtaining oxide thin-film materials for various purposes: a review of research results at the Department of Inorganic Chemistry of Tomsk State University // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2021, 27, 39–53. doi: 10.17223/24135542/27/3

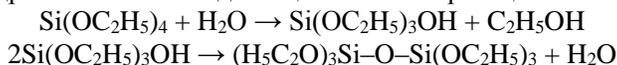
Композиционные тонкопленочные оксидные материалы с полифункциональными свойствами широко применяются в качестве чувствительных элементов датчиков газов, светоперераспределяющих, защитных, биологически активных и диэлектрических покрытий [1–7]. В то же время развитие любых сфер человеческой деятельности требует постоянного совершенствования элементной базы микроэлектроники и оптики, а также медицинских материалов, например для лечения заболеваний опорно-двигательной системы. В связи с этим наноразмерные пленки, которые являются двумерными нано-объектами, постоянно вызывают научный интерес. В этих объектах исследования функциональные свойства зависят прежде всего от их толщины, которая определяется размером частиц в нанодиапазоне. Однако зависимость их свойств от размера частиц отсутствует, что выделяет их среди других объектов исследования. Отличительная черта пленок по сравнению с другими наноматериалами заключается в том, что их свойства определяются в основном состоянием поверхностных атомов, так как объем, занимаемый поверхностными атомными слоями, сопоставим с объемом самой пленки.

Из всех методов получения тонкопленочных оксидных материалов золь-гель метод является самым технологически простым. Этот метод дает возможность управлять протекающими в золе процессами на молекулярном уровне, позволяя предопределять структуру и свойства синтезируемых материалов. Пленки по золь-гель технологии впервые были получены академиком И.В. Гребенщиковым [8]. Это были пленки диоксида кремния на стеклянных подложках. В качестве исходной системы применяли этанольный раствор тетраэтоксисилана. В дальнейшем стали применять золи на основе водных и спиртовых растворов не только алкоксидов, но и других солей металлов, в том числе комплексных соединений, способных подвергаться гидролизу. Необходимость выбора гидролизующихся катионов связана с процессами формирования золя: частичный или полный гидролиз солей

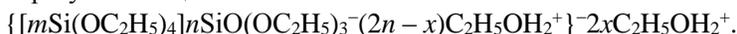
с последующей поликонденсацией [9–12]. После нанесения золя на твердотельную подложку при комнатной температуре формируется гель, а термическая обработка полученного материала приводит к образованию оксидной фазы в тонкопленочном состоянии.

Получением тонкопленочных оксидных материалов по золь-гель технологии на кафедре неорганической химии Томского государственного университета стали заниматься с 1980 г. в рамках научного направления «Создание научных основ целенаправленного синтеза функционально-чувствительных неорганических веществ и материалов». Родоначальниками этих исследований были В.В. Козик и А.П. Сергеев, впоследствии доктора наук. Активно данное направление стало развиваться с 1986 г., когда заведовать кафедрой стал профессор В.В. Козик. Работы коллектива сотрудников были направлены на изучение физико-химических процессов формирования тонкопленочных материалов на основе оксидов элементов III и IV групп периодической системы Д.И. Менделеева из пленкообразующих растворов. Комплексные исследования процессов и механизмов формирования композиционных оксидных наноматериалов $\text{SiO}_2\text{--}\text{Э}_x\text{O}_y$ (Э – редкоземельные элементы (РЗЭ), Sn, Mn, Co, Ni, Ca, P) [13–20], $\text{TiO}_2\text{--}\text{Э}_x\text{O}_y$ (Э – Si, Sn, Co, Ni) [21–25], $\text{SnO}_2\text{--}\text{Э}_x\text{O}_y$ (Э – In, Sb, Ce) [26–29], GeO_2 , ZrO_2 , HfO_2 [30–33] в виде тонких пленок позволили создать физико-химические основы технологий их получения, выявить химические особенности процессов синтеза и установить взаимосвязь между составом, структурой, физико-химическими свойствами пленкообразующих растворов (золей) и структурой, физико-химическими и функциональными свойствами тонкопленочных оксидных материалов. Ниже представлен краткий обзор научных и практических достижений коллектива кафедры за период с 1980 по 2021 г.

Характерной особенностью пленкообразующих растворов является способность образовывать золи, из которых формируются тонкие пленки со стабильными свойствами. Пленкообразующая способность золей сохраняется в устойчивой временной области, где устанавливается химическое равновесие. Мицеллообразованию предшествуют процессы сольватации, гидролиза, коомплексообразования и поликонденсации. В этанольном растворе тетраэтоксисилана (ТЭОС) образование золя происходит в течение двух суток [34]. По результатам ЯМР ^{29}Si после смешивания всех компонентов через 10 мин в спектре фиксируются как продукты гидролиза ТЭОС, так и продукты конденсации гидроксосиланов [16, 17]. Гидролиз ТЭОС протекает по механизму бимолекулярного замещения SN_2 и зависит от концентрации воды в золе [18]. Вязкость системы в это время значительно меняется в результате гидролиза и поликонденсации согласно реакциям

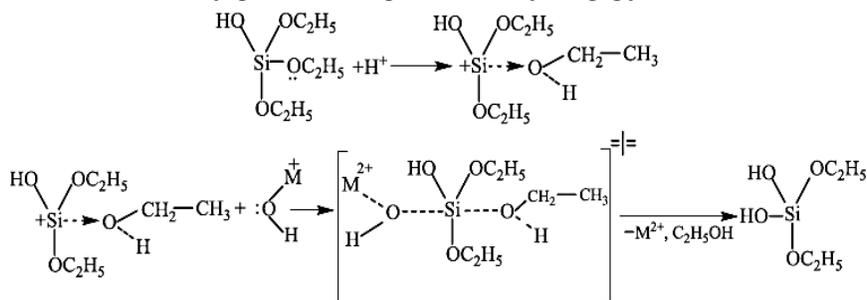


По истечении двух суток скорость этих реакций уменьшается в связи с пространственными затруднениями, вязкость раствора меняется медленно. В золе образуются мицелла



После накопления в растворе силоксанов с концевыми группами –ОН вязкость увеличивается вследствие процессов их циклизации, обусловленных подвижностью связи Si–O [34, 35], что приводит к образованию сетчатой структуры золя. Раствор через некоторое время из золя переходит в гель. При этом пленки из таких растворов получаются неоднородными, часто отслаиваются, что делает гели непригодными для использования.

В пленкообразующих растворах с солями *d*-металлов Mn^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} молекулы тетраэтоксисилана сохраняются в течение 3–7 ч, в то время как раствор без солей уже через 1,5 ч содержит лишь незначительное количество тетраэфира [18]. Снижается скорость гидролиза ТЭОС из-за вхождения иона металла во внутреннюю координационную сферу комплексов:



В ряду Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} возрастает скорость гидролиза их солей. Раствор, содержащий ионы Ni^{2+} , уже через 10 мин созревания содержит наибольшую концентрацию ди- и тригидроксопроизводных тетраэтоксисилана по сравнению с растворами с ионами Co^{2+} , Mn^{2+} . Это приводит и к повышению скорости сшивания силоксановых групп. Усиление гидролитической поликонденсации ТЭОС в этанольном растворе не наблюдается при введении в него нитратов РЗЭ [13–15]. Добавки нитратов РЗЭ выступают в качестве стабилизаторов коллоидной системы полисилоксанов. Установлено, что повышение концентрации соли РЗЭ, а также увеличение заряда ядра по ряду РЗЭ приводят к повышению устойчивости золя к коагуляции частиц. Аналогичные процессы наблюдаются и при введении солей висмута [36].

Введение хлорида кальция и ортофосфорной кислоты в этанольный раствор ТЭОС приводит к протеканию следующих последовательных химических процессов [37–39]: взаимодействие хлорида кальция ортофосфорной кислотой с образованием малорастворимого гидрофосфата кальция и образование положительно заряженной мицеллы предполагаемого состава $\{[m\text{CaHPO}_4]n\text{Ca}^{2+}x\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3\text{OH}^{2+}\}^{(2n-x)+}2(n-x)\text{Cl}^-$. По данным фотонно-корреляционной спектроскопии радиусы частиц дисперсной фазы в устойчивом золе находятся в диапазоне 5–23 нм.

Увеличения стабильности золь можно достигать и добавлением органических лигандов [20], которые участвуют в процессе образования комплексной соли в растворе. В качестве лигандов используют, например, салициловую кислоту. В работе [40] установлено, что значения вязкости в золях $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3\text{--C}_6\text{H}_4\text{ONCOOH--Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{--C}_2\text{H}_5\text{OH}$ уменьшаются с увеличением

содержания в их составе ТЭОС. При этом наблюдается снижение энергии активации вязкого течения, рассчитанной на основании теории Эйринга [41]. Следовательно, зависимость значения вязкости золей от содержания в них ТЭОС соотносится с изменениями энергетических затрат процесса вязкого течения: снижается электростатическое взаимодействие растворенных веществ между собой и с молекулами растворителя. Установленный размер частиц указывает на то, что растворы являются коллоидными. Так, размер частиц в растворе на 4-е сутки со дня приготовления составляет ~ 70 нм, тогда как на 6-е сутки размер частиц достигает 96 нм. Изменение вязкости такого золя связано с ростом коллоидных частиц. Добавка же салициловой кислоты позволяет получать золи, у которых пленкообразующая способность формируется уже ко вторым суткам после их приготовления. Органические лиганды можно использовать не только в качестве кислотных остатков солей, но и в качестве растворителей. Таким лигандом является ацетилацетон. В работе [42] показана возможность получения высокоомных ($5 \cdot 10^3$ кОм), прозрачных в видимой области спектра ($T = 92\%$) пленок $\text{SnO}_2\text{-Sb}_x\text{O}_y$ на стеклянных подложках из пленкообразующих ацетилацетоновых растворов на основе хлоридов олова(II, IV) и сурьмы(III). Пленкообразующая способность в таких растворах [43] формируется за счет электростатического взаимодействия сольватированных ионов хлора и комплексных ионов $[\text{Sn}(\text{Hacac})_x]^{2+}$ ($[\text{Sn}(\text{Hacac})_x]^{4+}$), $[\text{Sb}(\text{acac})_n]^{(3-n)+}$. По данным электрофореза растворы являются коллоидными и состоят из отрицательно заряженных частиц.

Стабилизации вязкости пленкообразующих растворов на основе тетрабутоксититана (ТБТ) способствует введение ТЭОС [21]. При одновременном введении в раствор двух пленкообразующих веществ – $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ и $\text{Ti}(\text{OC}_4\text{H}_9)_4$ – имеют место процессы их гидролиза, а также гомо- и менее выраженной гетероконденсации соответствующих гидроксопроизводных. Степень конденсации силоксановых цепочек снижается в присутствии тетрабутоксититана из-за участия катализатора (ионов лиония $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}_2^+$). Глубокому протеканию процессов гидролиза в спиртовых растворах способствует увеличение кислотности растворов за счет введения солей *d*-металлов. Хлорид кобальта(II) увеличивает степень гидролиза ТЭОС и ускоряет процессы конденсации его гидроксопроизводных в присутствии ТБТ [22, 23]. Это связано с увеличением в составе золя комплексных ионов $[\text{TiCl}_6]^{2-}$ и $[\text{CoCl}_4]^{2-}$. Экспрессным критерием достижения равновесия в золе может являться электродный потенциал восстановления. В работе [24] показано, что ход зависимости значения электродного потенциала восстановления в спиртовом подкисленном растворе хлорида никеля(II) идентичен ходу изменения вязкости во времени. Добавка хлорида никеля(II) в раствор ТБТ в бутаноле с незначительным содержанием воды приводит к росту вязкости раствора и снижению его устойчивости. Добавка же хлорида олова(IV) в бутанольный раствор ТБТ не оказывает влияния на устойчивость золя, но незначительно повышает вязкость [25]. Результаты ИК-спектроскопии свидетельствуют о том, что гидролиз ТБТ и SnCl_4 происходит в бутаноле с участием кристаллизационной воды $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Характерной особенностью зольей на основе оксохлорида циркония является значительно больший временной интервал сохранения пленкообразующих свойств. Данная особенность объясняется тем, что для ионов циркония в растворах характерно образование полиядерных кластеров [34, 44], причем эта структура сохраняется и при кристаллизации геля. Устойчивостью образующегося комплекса $[Zr_4(OH)_8(H_2O)_{16}]^{8+}$, а также получающихся в процессе сольватации соединений вида $[Zr_4(OH)_8(H_2O)^{16-x}(C_2H_5OH)_x]^{8+}$ к гидролизу, видимо, и объясняется большой интервал сохранения пленкообразующих свойств золя на основе оксохлорида циркония. Рассчитанные константы равновесия и энергия Гиббса показали, что в системе на основе оксохлорида циркония идут параллельные процессы гидролиза и поликонденсации, что доказывает образование в растворе различного состава полиядерных устойчивых структур.

На основании проведенных исследований процессов, приводящих к формированию пленкообразующих свойств зольей, авторы разработали технологические схемы получения материалов со стабильными свойствами. Обобщенная технологическая схема приготовления зольей на примере зольей на основе ТЭОС и ТБТ (при равных концентрациях основного компонента золя и добавок к нему), обладающих пленкообразующей способностью, представлена на рис. 1.

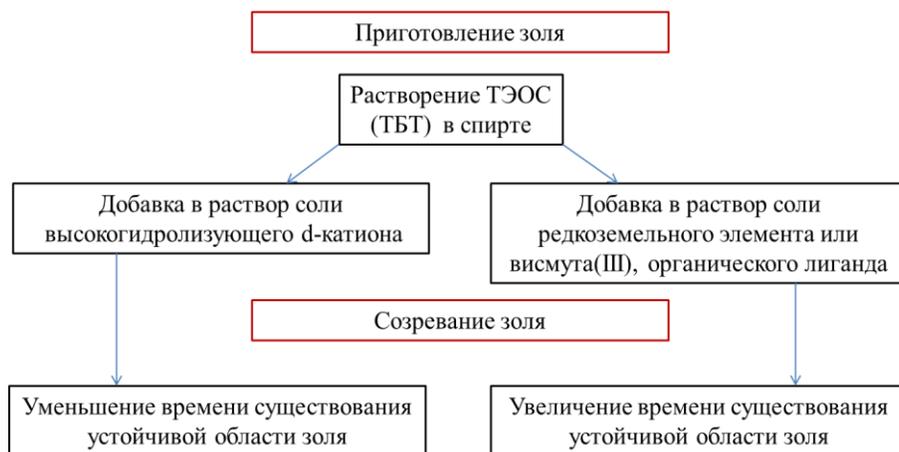


Рис. 1. Схема приготовления золя с разными временными интервалами устойчивой области пленкообразования

После достижения золем устойчивой области пленкообразования, которая характеризуется отсутствием изменения вязкости, электродного потенциала, размера коллоидной частицы, золь наносят на твердотельную подложку центрифугированием и вытягиванием. Данные методы нанесения не только позволяют получать сплошные пленки, но и дают возможность масштабировать нанесение. После нанесения золя пленки подвергаются сушке для удаления растворителя, при этом золь переходит в состояние

геля. Дальнейшая высокотемпературная обработка геля приводит к его полной термодеструкции и образованию оксидных фаз. Отмечено, что формируемая сетчатая структура золя с ТЭОС сохраняется и в оксидной пленке $\text{SiO}_2\text{-M}_x\text{O}_y$ (рис. 2).

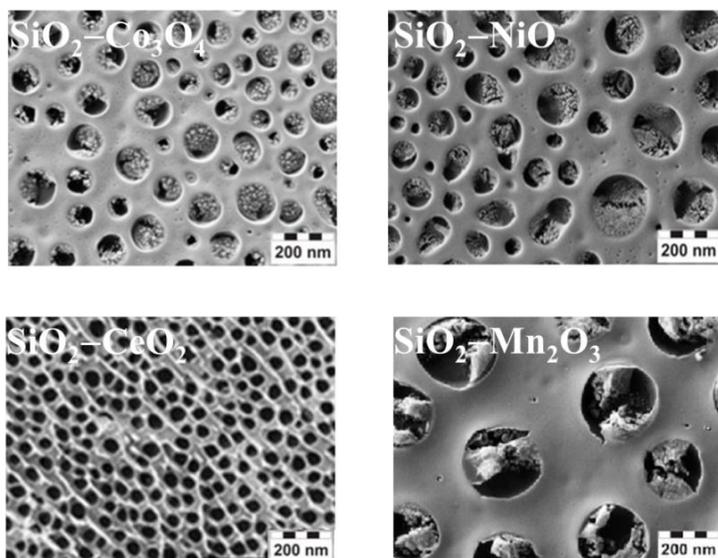


Рис. 2. Микрофотографии пленок с концентрацией M_xO_y 20–30 мас. %

Согласно микрорентгеноспектральному анализу, в порах располагаются частицы оксидов металла, и их размер зависит от агломерата оксида. Уменьшение содержания добавки оксида металла приводит и к уменьшению пористости образцов.

Температурные режимы отжига гелей зависят от состава золя и полученных оксидных фаз, что, в свою очередь, определяет свойства пленок. Важным с технологической точки зрения параметром является и скорость нагрева в процессе отжига. Установлено, что нагревание геля на подложке со скоростью 5–10°/мин способствует формированию более сплошной и равномерной пленки оксида, чем отжиг геля при скорости нагрева 14–20°/мин [18, 40]. Более высокая скорость нагрева приводит к образованию в структуре пленок трещин, что вызвано процессами релаксации внутренних напряжений, развивающихся за счет различия коэффициентов термического расширения пленки и подложки. В работе [18] показано, что увеличение скорости нагрева до 25°/мин препятствует процессу слияния пор, что в случае системы $\text{SiO}_2\text{-Co}_3\text{O}_4$ приводит к формированию пленок с плотной мелкопористой структурой.

В последнее время коллектив кафедры неорганической химии работает над созданием физико-химических основ низкотемпературного получения оптически прозрачных и проводящих наноструктурированных слоев оксидов TiO_2 , ZnO , SnO_2 , In_2O_3 , в том числе модифицированных примесями *p*- и

d-элементов, которые являются перспективными материалами фотоанодов сенсibilизированных солнечных элементов. Имеется много работ по получению пленок такого состава с использованием золь-гель метода, однако температура получения проводящих и прозрачных оксидов составляет не менее 400–600°C [45–47]. Это серьезное препятствие для использования гибких прозрачных подложек фотоанода, выдерживающих температуру 200–300°C, при получении на них оксидных пленок. Ранее полученный научный задел по формированию пленкообразующей способности зольей на сегодняшний день позволил снизить температуру синтеза пленок ZnO и TiO₂–SnO₂ до 350°C с сохранением их проводимости и прозрачности.

Из исследований, проводимых на кафедре неорганической химии Томского государственного университета, следует, что золь-гель метод представляет собой перспективный метод синтеза тонкопленочных оксидных материалов. Понимание химической сути процессов формирования зольей, приводящих к пленкообразующей способности, позволяет целенаправленно делать выбор состава золя, контролировать и управлять процессом поликонденсации, а также процессами гелеобразования в нем. Выбор добавок в состав основного компонента золя должен основываться на знании не только его растворимости, но и гидролизующей способности, что может изменить степень поликонденсации и агрегативную устойчивость золя. В качестве растворителя в составе золя может быть органический лиганд в жидком состоянии, который, помимо того что отвечает всем требованиям, предъявляемым к растворителям в золь-гель методе, способен вступать в реакции комплексообразования с пленкообразующим веществом. Структура золя определяет морфологию поверхности оксидных пленок.

Список источников

1. Periyasamy A.P., Venkataraman M., Kremenakova D., Militky J., Zhou Y. Progress in sol-gel technology for the coatings of fabrics, review // *Materials*. 2020. V. 13 (1838). P. 1–34.
2. Inayat A., Reinhardt B., Herwig J., Küster C., Uhlig H., Krenkel S., Raedlein E., Enke D. Recent advances in the synthesis of hierarchically porous silica materials on the basis of porous glasses // *New J. Chem*. 2016. V. 40. P. 4095–4114.
3. Kim H.K., Kang S.-J., Choi S.-K., Min Y.-H., Yoon C.-S. Highly efficient organic / inorganic hybrid nonlinear optic materials via sol-gel process: synthesis, optical properties, and photobleaching for channel waveguides // *Chem. Mater*. 1999. V. 11. P. 779–788.
4. Owens G.J., Singh R.K., Foroutan F., Alqaysi M., Han C.-M., Mahapatra C., Kim H.-W., Knowles J.C. Sol-gel based materials for biomedical applications // *Prog. Mater. Sci*. 2016. V. 77. P. 1–79.
5. Aleksandrova M., Jivov B., Lakov L. Summary of sol-gel synthesis of materials with electronic applications // *Materials science*. 2020. V. 3. P. 83–85.
6. Jmal N., Bouaziz J. Fluorapatite-glass-ceramics obtained by heat treatment of a gel synthesized by the sol-gel processing method // *Mater. Sci. Eng*. 2017. V. 71. P. 279–288.
7. Borilo L.P., Kozik V.V., Lyutova E.S., Zharkova V.V., Brichkov A.S. Sol-gel production and properties of spherical biomaterials for the system TiO₂–SiO₂/CaO // *Glass and Ceramics*. 2019. V. 76 (7–8). P. 315–320.
8. Гребенщиков И.В., Власов А.Г., Непорент Б.С., Суйковская Н.В. Просветление оптики. М.: Гостехиздат, 1946. 126 с.

9. Суйковская Н.В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок. Л. : Химия, 1971. 230 с.
10. Палатник Л.С., Сорокин В.К. Основы пленочного полупроводникового материаловедения. М. : Энергия, 1973. 295 с.
11. Аткарская А.Б. Изменение свойств пленкообразующих растворов при старении // Стекло и керамика. 1977. № 10. С. 14–18.
12. Семченко Г.Д. Золь-гель процесс в керамической технологии. Харьков : БИ, 1997. 143 с.
13. Борило Л.П. Тонкопленочные неорганические наносистемы. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. 134 с.
14. Козик В.В., Борило Л.П., Турецкова О.В. Тонкопленочные композиционные материалы на основе SiO_2 и оксидов РЗЭ // Конденсированные среды и межфазные границы. 2002. Т. 4, № 3. С. 231–235.
15. Верещагин В.И., Козик В.В., Борило Л.П. и др. Полифункциональные неорганические материалы на основе природных и искусственных соединений. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2002. 359 с.
16. Бричкова В.Ю., Бричков А.С., Егорова Л.А., Заболотская А.В., Иванов В.К. Исследование процессов формирования систем двойных оксидов кремния и *d*-металлов // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2011. № 11. С. 139–142.
17. Бричкова В.Ю., Козик В.В., Борило Л.П. Синтез и изучение свойств тонкопленочной и дисперсной системы $\text{SiO}_2\text{--P}_2\text{O}_5$ // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 6. С. 92–96.
18. Бричкова В.Ю. Технология и физико-химические свойства тонкопленочных материалов на основе двойных оксидов кремния и *d*-металлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2011. 22 с.
19. Борило Л.П., Петровская Т.С., Лютова Е.С., Спивакова Л.Н. Синтез и физико-химические свойства тонкопленочных и дисперсных функциональных силикофосфатных материалов // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319, № 3. С. 43–47.
20. Кузнецова С.А., Халипова О.С., Козик В.В. Пленки на основе диоксида церия: получение, свойства, применение. Томск : Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2016. 200 с.
21. Бричков А.С. Технология и физико-химические свойства тонкопленочных и дисперсных материалов на основе оксидов титана, кремния и кобальта : автореф. дис. ... канд. техн. наук; Томск, 2013. 22 с.
22. Бричков А.С. Процессы формирования тонкопленочных и дисперсных материалов состава Ti--Si--Co--O , их газочувствительные свойства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 4. С. 100–103.
23. Бричков А.С., Бричкова В.Ю., Козик В.В. Исследование процесса созревания пленкообразующих растворов на основе тетрабутоксититана, тетраэтоксилана и шестиводного хлорида кобальта(II) // Материалы Всероссийской конференции «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». Кемерово, 2012. С. 72–75.
24. Шамсутдинова А.Н., Козик В.В. Получение и свойства тонких пленок на основе оксидов титана, кремния и никеля // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. № 24. С. 699–704.
25. Kuznetsova S., Khalipova O., Chen Y.-W., Kozik V. The joint effect of doping with tin(IV) and heat treatment on the transparency and conductivity of films based on titanium dioxide as photoelectrodes of sensitized solar cells // Nanosystems: Phys. Chem. Math. 2022. V. 13 (2). P. 193–205.
26. Кузнецова С.А., Борило Л.П. Получение золь-гель методом тонких пленок оксида индия с добавками олова на стеклянных подложках // Стекло и керамика. 2013. № 12. С. 8–12.
27. Кузнецова С.А., Малиновская Т.Д., Зайцева Е.С., Сачков В.И. Индийолово оксидные пленки, полученные из растворов на основе ацетилацетона // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77, № 10. С. 1621–1624.

28. Кузнецова С.А., Малиновская Т.Д. Свойства нанопленок $\text{SnO}_2:\text{Sb}$, $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2006. Т. 3, № 4. С. 50–52.
29. Khalipova O.S., Kuznetsova S.A. Synthesis and properties of $\text{CeO}_2\text{-SnO}_2$ films // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2013. V. 58 (8). P. 892–897.
30. Козик В.В., Чернов Е.Б., Борило Л.П., Турецкова О.В., Шульпеков А.М. Изучение физико-химических процессов в пленкообразующих этанольных растворах солей циркония, кобальта и свойства тонких пленок, полученных на их основе // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77, № 2. С. 188–192.
31. Козик В.В., Кузнецова С.А., Борило Л.П. Получение пленок ZrO_2 , HfO_2 , SnO_2 из растворов комплексных соединений // Химия в интересах устойчивого развития. 2003. Т. 11, № 5. С. 739–742.
32. Dyukov V.V., Kuznetsova S.A., Borilo L.P., Kozik V.V. Film-forming capacity of Sn(II) , Zr(IV) , Hf(IV) acetyl acetonates // Russian Journal of Applied Chemistry. 2001. V. 74 (10). P. 1636–1640.
33. Козик В.В., Борило Л.Н., Чернов Е.Б., Лыскова Е.А. Тонкопленочные наносистемы на основе двойных оксидов циркония и германия // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 5. С. 64–67.
34. Gryaznov R.V., Borilo L.P., Kozik V.V., Shul'pekov A.M. Thin $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ films prepared from solutions // Inorganic Materials. 2001. V. 37 (7). P. 698–701.
35. Силокановая связь / под ред. М.Г. Воронкова. Новосибирск : Наука, 1976. 413 с.
36. Borilo L.P., Kuznetsova S.A., Kozik V.V., Zabolotskaya A.V., Mal'chik A.G. Synthesis and properties of films in the $\text{SiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ system // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2014. V. 59 (10). P. 1065–1068.
37. Borilo L.P., Lyutova E.S. Synthesis and properties of bioactive thin-film materials based on the $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ and $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-TiO}_2$ systems // Inorganic Materials. 2017. V. 53 (4). P. 400–405.
38. Petrovskaya T., Kuznetsova S., Borilo L., Kozik V. The processes in film-forming solution based on tetraethoxysilane, phosphoric acid and calcium chloride // AIP Conference Proc. 2016. V. 1772. P. 020006-1–020006-7.
39. Козик В.В., Петровская Т.С., Борило Л.П. Физико-химические процессы при формировании тонких пленок в системе $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ // Химия и химическая технология. 2010. Т. 53 (8). С. 120–124.
40. Khalipova O.S., Kuznetsova S.A., Kozik V.V. Composition and properties of $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2$ composite films prepared from film-forming solution // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2014. V. 59 (9). P. 913–917.
41. Эрдей-Груз Т. Явления переноса в водных растворах. М. : Мир, 1976. 596 с.
42. Кузнецова С.А., Малиновская Т.Д., Сачков В.И. Влияние структуры комплексных частиц в пленкообразующем растворе на структуру и свойства пленок $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, $\text{SnO}_2:\text{Sb}$ // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 2. С. 105–108.
43. Кузнецова С.А., Мишенина Л.Н., Козик В.В. Формирование пленкообразующих ацетилацетоновых растворов $\text{SnCl}_2\text{-2H}_2\text{O-SbCl}_3$ и $\text{SnCl}_4\text{-SbCl}_3$ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2013. № 6 (100). С. 131–135.
44. Kozik V.V., Borilo L.P., Shul'pekov A.M. Preparation, phase composition, and optical properties of thin $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ films // Inorganic Materials. 2001. V. 37 (1). P. 47–50.
45. Bose A.C., Kalpana D., Thangadurai P., Ramasamy S. Synthesis and characterization of nanocrystalline SnO_2 and fabrication of lithium cell using nano- SnO_2 // Power Sources. 2002. V. 107. P. 138–141.
46. Yang Y., Zhang Q., Zhang B., Mi W.B., Chen L., Li L., Zhao C., Diallo K.E.M., Zhang X.X. The influence of metal interlayers on the structural and optical properties of nano-crystalline TiO_2 films // Appl. Surf. Sci. 2012. V. 258. P. 4532–4537.
47. Kaleji B.K., Sarraf-Mamoory R. Nanocrystalline sol-gel $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ coatings: preparation, characterization and photo-catalytic performance // Mater. Res. Bull. 2012. V. 47. P. 362–369.

References

1. Periyasamy A.P.; Venkataraman M.; Kremenakova D.; Militky J.; Zhou Y. Progress in sol-gel technology for the coatings of fabrics, review. *Materials*. 2020, 13, 1838, 1–34.
2. Inayat A.; Reinhardt B.; Herwig J.; Küster C.; Uhlig H.; Krenkel S.; Raedlein E.; Enke D. Recent advances in the synthesis of hierarchically porous silica materials on the basis of porous glasses. *New J. Chem.* 2016, 40, 4095–4114.
3. Kim H. K.; Kang S.-J.; Choi S.-K.; Min Y.-H.; Yoon C.-S. Highly efficient organic/inorganic hybrid nonlinear optic materials via sol-gel process: synthesis, optical properties, and photobleaching for channel waveguides. *Chem. Mater.* 1999, 11, 779–788.
4. Owens G.J.; Singh R.K.; Foroutan F.; Alqaysi M.; Han C.-M.; Mahapatra C.; Kim H.-W.; Knowles J.C. Sol-gel based materials for biomedical applications. *Prog. Mater. Sci.* 2016, 77, 1–79.
5. Aleksandrova M.; Jivov B.; Lakov L. Summary of sol-gel synthesis of materials with electronic applications. *Materials science*. 2020, 3, 83–85.
6. Jmal N.; Bouaziz J. Fluorapatite-glass-ceramics obtained by heat treatment of a gel synthesized by the sol-gel processing method. *Mater. Sci. Eng.* 2017, 71, 279–288.
7. Borilo L.P.; Kozik V.V.; Lyutova E.S.; Zharkova V.V.; Brichkov A.S. Sol-gel production and properties of spherical biomaterials for the system $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2/\text{CaO}$. *Glass and Ceramics*. 2019, 76, 7–8, 315–320.
8. Grebenschikov I.V.; Vlasov A.G.; Neporent B.S.; Sujkovskaya N.V. *Prosvetlenie optiki [Optical illumination]*. M.: Gostexizdat, 1946. 126 p. (in Russian)
9. Sujkovskaya N.V. *Ximicheskie metody polucheniya tonkih prozrachnykh plenok [Chemical methods of obtaining thin transparent films]*. L.: Khimiya, 1971. 230 p. (in Russian)
10. Palatnik L.S.; Sorokin V.K. *Osnovy plenochного poluprovodnikovogo materialovedeniya [Fundamentals of film semiconductor materials science]*. M.: Energiya, 1973. 295 p. (in Russian)
11. Atkarskaya A.B. *Izmenenie svojstv plenkoobrazuyushchix rastvorov pri starenii [Changes in the properties of film-forming solutions during aging]*. *Steklo i keramika*. 1977, 10, 14–18. (in Russian)
12. Semchenko G.D. *Zol'-gel' process v keramicheskoy tekhnologii [Sol-gel process in ceramic technology]*. Xar'kov, 1997. 143 p. (in Russian)
13. Borilo L.P. *Tonkoplennyye neorganicheskie nanosistemy [Thin-film inorganic nanosystems]*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo gos. Universiteta, 2003. 134 p. (in Russian)
14. Kozik V.V.; Borilo L.P.; Tureczkova O.V. *Tonkoplennyye kompozitsionnyye materialy na osnove SiO_2 i oksidov RZE' [Thin-film composites based on SiO_2 and REE oxides]*. *Kondensirovannyye sredy imezhfaznyye granicy*. 2002, 4, 3, 231–235. (in Russian)
15. Vereshagin V.I.; Kozik V.V.; Borilo L.P. i dr. *Polifunktsionalnyye neorganicheskie materialy na osnove prirodnykh i iskusstvennykh soedinenij [Polyfunctional inorganic materials based on natural and synthetic compounds]*. Tomsk: Izd-vo TGU, 2002. 359 p. (in Russian)
16. Brichkova V.Yu.; Brichkov A.S.; Egorova L.A.; Zabolotskaya A.V.; Ivanov V.K. *Issledovanie processov formirovaniya sistem dvoynnykh oksidov kremniyai d-metallov [Study of the formation of double silicon and d-metal oxide systems]*. *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2011, 11, 139–142. (in Russian)
17. Brichkova V.Yu.; Kozik V.V.; Borilo L.P. *Sintez i izuchenie svojstv tonkoplennoy dispersnoy sistemy $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ [Synthesis and study of properties of $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ thin film and disperse system]*. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*. 2004, 307, 6, 92–96. (in Russian)
18. Brichkova V.Yu. *Texnologiya i fiziko-khimicheskie svojstva tonkoplennyykh materialov na osnove dvoynnykh oksidov kremniyai d-metallov [Technology and physicochemical properties of thin-film materials based on double silicon and d-metal oxides]*. Referat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kand. tehn. nauk. – Tomsk, 2011. 22 p. (in Russian)
19. Borilo L.P.; Petrovskaya T.S.; Lyutova E.S.; Spivakova L.N. *Sintez i fiziko-khimicheskie svojstva tonkoplennyykh i dispersnykh funktsionalnykh silikofosfatnykh materialov [Synthesis*

- and physicochemical properties of thin-film and dispersed functional silicophosphate materials]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*. 2011, 319, 3, 43–47. (in Russian)
20. Kuzneczova S.A.; Xalipova O.S.; Kozik V.V. Plenki na osnove dioksida ceriya: poluchenie, svoystva, primeneniye [Cerium dioxide-based films: production, properties, applications]. Tomsk: Izdatel'skij dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016. 200 p. (in Russian)
 21. Brichkov A.S. *Texnologiya i fiziko-ximicheskie svoystva tonkoplenochny`x idispersnyx materialov na osnove oksidov titana, kremniya i kopal'ta* [Technology and physical and chemical properties of thin films and dispersed materials based on titanium, silicon and cobalt oxides] avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk Tomsk, 2013; 22 p. (in Russian)
 22. Brichkov A.S. *Processy formirovaniya tonkoplenochnyx i dispersnyx materialov sostava Ti–Si–Co–O, ix gazochuvstvitelnye svoystva* [Formation processes of thin-film and dispersed materials of Ti–Si–Co–O composition, their gas-sensitive properties]. *Vestnik KuzGTU*. 2013, 4, 100–103. (in Russian)
 23. Brichkov A.S.; Brichkova V.Yu.; Kozik V.V. *Issledovanie processa sozrevaniya plenkoobrazuyushhix rastvorov na osnove tetrabutoksititana, tetraetoksisilana i shestivodnogo xlorida kobalta(II)* [Study of the maturation process of film-forming solutions based on tetrabutoxytitanium, tetraethoxysilane, and hexavalent cobalt(II) chloride]. *Materialy Vserossijskoj konferencii «Ximiya i ximicheskaya texnologiya: dostizheniya i perspektivy»*. Kemerovo, 2012. P. 72–75. (in Russian)
 24. Shamsutdinova A.N.; Kozik V.V. *Poluchenie i svoystva tonkix plenok na osnove oksidov titana kremniya i nikelya* [Preparation and properties of thin films based on titanium silicon and nickel oxides]. *Ximiya v interesax ustojchivogo razvitiya*. 2016, 24, 699–704. (in Russian)
 25. Kuznetsova S.; Khalipova O.; Chen Y.-W.; Kozik V. *The joint effect of doping with tin(IV) and heat treatment on the transparency and conductivity of films based on titanium dioxide as photoelectrodes of sensitized solar cells*. *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* 2022, 13 (2), 193–205.
 26. Kuzneczova S.A.; Borilo L.P. *Poluchenie zol-gel metodom tonkix plenok oksida indiya s dobavkami olova na steklyannyx podlozhkax* [Sol-gel fabrication of indium oxide thin films with tin additives on glass substrates]. *Steklo i keramika*. 2013, 12, 8–12. (in Russian)
 27. Kuzneczova S.A.; Malinovskaya T.D.; Zajceva E.S.; Sachkov V.I. *Indijolovo oksidnye plenki, poluchennye iz rastvorov na osnove acetylacetonata* [Indium-tin oxide films obtained from acetylacetonate-based solutions]. *Zhurnal prikladnoj ximii*. 2004, 77, 10, 1621–1624. (in Russian)
 28. Kuzneczova S.A.; Malinovskaya T.D. *Svoystva nanoplenok SnO₂:Sb, In₂O₃:Sn* [Properties of SnO₂:Sb, In₂O₃:Sn nanofilms]. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2006, 3, 4, 50–52. (in Russian)
 29. Khalipova O.S.; Kuznetsova S.A. *Synthesis and properties of CeO₂–SnO₂ films*. *Russian journal of inorganic chemistry*. 2013, 58, 8, 892–897.
 30. Kozik V.V.; Chernov E.B.; Borilo L.P.; Tureczkova O.V.; Shulpekov A.M. *Izuchenie fiziko-ximicheskix processov v plenkoobrazuyushhix etanolnyx rastvorax solej cirkoniya, kobalta i svoystva tonkix plenok, poluchennyx na ix osnove* [Study of physical and chemical processes in film-forming ethanol solutions of zirconium and cobalt salts and properties of thin films obtained on their basis]. *Zhurnal prikladnoj ximii*. 2004, 77, 2, 188–192. (in Russian)
 31. Kozik V.V.; Kuzneczova S.A.; Borilo L.P. *Poluchenie plenok ZrO₂, HfO₂, SnO₂ iz rastvorov kompleksnyx soedinenij* [Obtaining of ZrO₂, HfO₂, SnO₂ films from complex compound solutions]. *Ximiya v interesax ustojchivogo razvitiya*. 2003, 11, 5, 739–742. (in Russian)
 32. Dyukov V.V.; Kuznetsova S.A.; Borilo L.P.; Kozik V.V. *Film-forming capacity of Sn(II), Zr(IV), Hf(IV) acetylacetonates*. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2001, 74, 10, 1636–1640.

33. Kozik V.V.; Borilo L.N.; Chernov E.B.; Lyskova E.A. Tonkoplenochnye nanosistemy na osnove dvoynyx oksidov cirkoniya i germaniya [Thin-film nanosystems based on double zirconium and germanium oxides]. *Izvestiya Tomskogo politexnicheskogo universiteta*. 2006, 309, 5, 64–67. (in Russian)
34. Gryaznov R.V.; Borilo L.P.; Kozik V.V.; Shul'pekova A.M. Thin $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ films prepared from solutions. *Inorganic Materials*. 2001, 37, 7, 698–701.
35. Siloksanovaya svyaz [Siloxane bonding]. Pod red. M.G. Voronkova. – Novosibirsk: Nauka, 1976. 413 p. (in Russian)
36. Borilo L.P.; Kuznetsova S.A.; Kozik V.V.; Zabolotskaya A.V.; Mal'Chik A.G. Synthesis and properties of films in the $\text{SiO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3$ system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014, 59, 10, 1065–1068.
37. Borilo L.P.; Lyutova E.S. Synthesis and properties of bioactive thin-film materials based on the $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO}$ and $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-TiO}_2$ systems. *Inorganic Materials*. 2017, 53, 4, 400–405.
38. Petrovskaya T.; Kuznetsova S.; Borilo L.; Kozik V. The processes in film-forming solution based on tetraethoxysilane, phosphoric acid and calcium chloride. *AIP Conference Proceeding*. 2016, 1772, 020006-1–020006-7.
39. Kozik V.V.; Petrovskaya T.S.; Borilo L.P. Fiziko-khimicheskie processy pri formirovani tonkix plenok v sisteme $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ [Physical and chemical processes during thin film formation in the $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ system]. *Ximiya i ximicheskaya tekhnologiya*. 2010, 53, 8, 120. (in Russian)
40. Khalipova O.S.; Kuznetsova S.A.; Kozik V.V. Composition and properties of $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2$ composite films prepared from film-forming solution. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014, 59, 9, 913–917.
41. Erdej-Gruz T. Yavleniya perenosa v vodnykh rastvorax [Transfer phenomena in aqueous solutions]. M.: Mir, 1976; 596 p. (in Russian)
42. Kuzneczoa S.A.; Malinovskaya T.D.; Sachkov V.I. Vliyanie struktury kompleksnykh chastic v plenkoobrazuyushhem rastvore na strukturu i svoystva plenok $\text{In}_2\text{O}_3\text{:Sn}$, $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ [Influence of the structure of complex particles in film-forming solution on the structure and properties of $\text{In}_2\text{O}_3\text{:Sn}$, $\text{SnO}_2\text{:Sb}$ films]. *Izvestiya TPU*. 2004, 307, 2, 105–108. (in Russian)
43. Kuzneczoa S.A.; Mishenina L.N.; Kozik V.V. Formirovanie plenkoobrazuyushhih acetilacetonovykh rastvorov $\text{SnCl}_2\text{-2H}_2\text{O-SbCl}_3$ i $\text{SnCl}_4\text{-SbCl}_3$ [Formation of film-forming acetylacetone solutions $\text{SnCl}_2\text{-2H}_2\text{O-SbCl}_3$ and $\text{SnCl}_4\text{-SbCl}_3$]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013, 6 (100), 131–135. (in Russian)
44. Kozik V.V.; Borilo L.P.; Shul'pekova A.M. Preparation, phase composition, and optical properties of thin $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ films. *Inorganic Materials*. 2001, 37, 1, 47–50.
45. Bose A.C.; Kalpana D.; Thangadurai P.; Ramasamy S. Synthesis and characterization of nanocrystalline SnO_2 and fabrication of lithium cell using nano- SnO_2 . *Power Sources*. 2002, 107, 138–141.
46. Yang Y.; Zhang Q.; Zhang B.; Mi W.B.; Chen L.; Li L.; Zhao C.; Diallo K.E.M.; Zhang X.X. The influence of metal interlayers on the structural and optical properties of nano-crystalline TiO_2 films. *Appl. Surf. Sci*. 2012, 258, 4532–4537.
47. Kaleji B.K.; Sarraf-Mamoory R. Nanocrystalline sol-gel $\text{TiO}_2\text{-SnO}_2$ coatings: preparation, characterization and photo-catalytic performance. *Mater. Res. Bull*. 2012, 47, 362–369.

Сведения об авторах:

Кузнецова Светлана Анатольевна – доцент, канд. хим. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: onm@mail.tsu.ru

Халипова Ольга Сергеевна – канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: Chalipova@mail.ru

Лютова Екатерина Сергеевна – канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: lyutova.tsu@mail.ru

Борило Людмила Павловна – профессор, д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия. E-mail: borilo@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kuznetsova Svetlana A. – associate professor, Ph.D. in chemistry, assistant professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: onm@mail.tsu.ru

Khalipova Olga S. – PhD in Technical Sciences, assistant professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: Chalipova@mail.ru

Lyutova Ekaterina S. – PhD in Technical Sciences, assistant professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: lyutova.tsu@mail.ru

Borilo Lyudmila P. – professor, PhD, professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia. E-mail: borilo@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 14.05.2022; принята к публикации 09.09.2022
The article was submitted 14.05.2022; accepted for publication 09.09.2022*