

Научная статья

УДК 544.773.422; 544.023.2

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-465-473>

CC BY 4.0

Особенности формирования пленок оксида кремния, модифицированных наночастицами металла

Вячеслав Иванович Павленко , Андрей Иванович Городов* , Роман Николаевич Ястребинский ,
Михаил Сергеевич Лебедев , Виталий Валерьевич Кашибадзе 

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: gorodov-andreyu@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Пленочные покрытия на основе оксида кремния обладают уникальными свойствами и широко распространены в различных областях промышленности, в том числе в строительстве. В работе представлены результаты по получению пленки из полиалкилгидроксисилоксановой жидкости в присутствии наноразмерных частиц металлического висмута. **Материалы и методы исследования.** Для получения наночастиц висмута использовали метод лазерной абляции металлического висмута в водной среде. Обработка поверхности мишени лазерным лучом производилась на рабочей станции иттербиевого импульсного волоконного лазера. Размер частиц и электрокинетические свойства коллоидных золь висмута определяли методом динамического рассеяния света. После высушивания порошок Bi добавляли в полиалкилгидроксисилоксановую жидкость. Методом окунания на стеклянные подложки нанесены тонкие пленки, отвержденные при разных режимах термообработки. Полученные пленки были оценены с помощью СЭМ, а также с использованием рентгенофазового анализа и ИК-Фурье спектроскопии. **Результаты и обсуждение.** В работе обсуждаются электрокинетические свойства коллоидных золь висмута. Лазерная абляция висмутовой подложки приводит к увеличению электропроводности и возникновению двойного электрического слоя в коллоидном золе. Показано влияние температуры отверждения на свойства покрытия. Установлено, что малое содержание наночастиц висмута в полиалкилгидроксисилоксановом покрытии (3% масс.) не приводит к образованию кристаллических фаз. При этом состав пленки и режим термической обработки влияют на ближний порядок молекулярных связей. Повышение содержания наночастиц висмута в покрытии до 10% масс. способствует появлению в системе микрокристаллических фаз силикатов висмута. **Заключение.** Полученные в ходе исследования результаты дополняют сведения о получении наночастиц висмута методом лазерной абляции и имеют большое значение в практике создания композиционных пленок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полиалкилгидроксисилоксан, диоксид кремния, наночастицы висмута, лазерная абляция, электрокинетический потенциал, покрытия, ИК-спектроскопия, силикаты висмута, органический кремний.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2023-0004 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Павленко В.И., Городов А.И., Ястребинский Р.Н., Лебедев М.С., Кашибадзе В.В. Особенности формирования пленок оксида кремния, модифицированных наночастицами металла // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 465–473. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-465-473>. – EDN: XUHDKC.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ученые всего мира уделяют большое внимание исследованию систем кремнезема. Это связано с уникальными свойствами материалов на основе оксида кремния и их широким применением в различных областях, таких как строительство, опто- и микроэлектроника, медицина, биология, энергетика, а также при производстве сенсоров [1].

Одними из наиболее распространенных материалов в современной промышленности являются пленки на основе оксида кремния. Они обладают высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и химическим воздействиям, а также низкой стоимостью производства. Кроме того, пленки на основе оксида кремния могут быть легко модифицированы для достижения необходимых свойств, что делает их универсальным материалом для различных приложений [2]. Например, для получения перспектив-

© Павленко В.И., Городов А.И., Ястребинский Р.Н., Лебедев М.С., Кашибадзе В.В., 2023

ных материалов энергонезависимой памяти ReRAM (Resistive Random-Access Memory) тонкие пленки из аморфного SiO_x имплантируют нанокластерами металлического цинка или его оксидом [3–4]. При этом в аморфной пленке оксида кремния формируются кристаллические фазы, содержащие Zn, что способствует проявлению уникальных свойств.

Среди методов получения аморфных пленок высокочистого оксида кремния широкое распространение благодаря простоте и доступности имеет осаждение из органических кремниевых соединений (силанов, алкоксидов кремния, алкилгидроксисилоксанов). Наличие реакционных связей Si–H в алкилгидроксисилоксанах делает их наиболее привлекательными при получении покрытий широкого спектра [5]. Однако состав и структура пленок, получаемых высокотемпературными методами, во многом зависит от температуры процесса. Из-за неполного разложения, при температуре до 700°C слой будет загрязнен кремнийорганическими соединениями. Выше 750°C слой SiO_2 загрязняется углеродом, карбидом кремния (SiC) и смолянистыми продуктами пиролиза [6].

С другой стороны, вызывают интерес пленки поликристаллического или монокристаллического оксида кремния [7]. Известно, что образование кристаллического кремнезема из химически чистого аморфного SiO_2 происходит при нагревании до температуры выше 1200°C [8]. Для получения кристаллического оксида кремния при более низких температурах применяют различные методы: гидротермальный [9], локальное высокоэнергетическое воздействие [10–11], создание полимерного шаблона [12] или индуцирующего тонкого металлического слоя [13–18], модифицирование поверхности наночастицами [19–20], включая структуры ядро-оболочка [21]. При этом на процессы кристаллизации пленок оксида кремния оказывает влияние подложка, например, при эпитаксии большое влияние, особенно при относительно низких температурах, оказывает кристаллографическая ориентация кремниевой под-

ложки [22–23]. Формирование и рост кристаллов на пластине с ориентацией (111) происходит лучше, чем с ориентацией (100). Такая зависимость объясняется тем, что различным кристаллографическим направлениям пластины соответствует разное количество связей Si–Si.

В литературе встречаются сообщения о низкотемпературном способе получения кристаллических частиц диоксида кремния в присутствии металлического висмута [18, 21]. Использование висмута обосновывается его низкой температурой эвтектики, что позволяет снизить тепловой баланс кристаллизации, а также высокой степенью чистоты металла и легкостью его удаления. Также публикуется большое количество работ, в которых силикаты висмута получены в рентгеноаморфном виде [24–26].

В данной статье исследуется влияние присутствия разного количества наноразмерных частиц висмута, полученных методом лазерной абляции металлического висмута в водной среде, на формирование и состав пленки, полученной из жидкости полиалкилгидроксисилоксана.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Вся процедура получения покрытий оксида кремния, модифицированных металлическими наноразмерными частицами висмута, состоит из нескольких этапов и представлена на рис. 1.

Наночастицы (НЧ) металлического висмута получены методом абляции в водной среде [21]. Мишень в виде пластин Bi (частота 99,999%), помещенная в кювету с дистиллированной водой с температурой $T = 60^\circ\text{C}$, подвергалась высокоэнергетическому лазерному воздействию при постоянном перемешивании с помощью магнитной мешалки. Обработка поверхности мишени лазерным лучом производилась на рабочей станции иттербиевого импульсного волоконного лазера (Minimarker 2-20 A4 PA, Россия) при следующих параметрах: длина волны 1064 нм, частота 3 кГц, выходная мощность 20 Вт. Длитель-

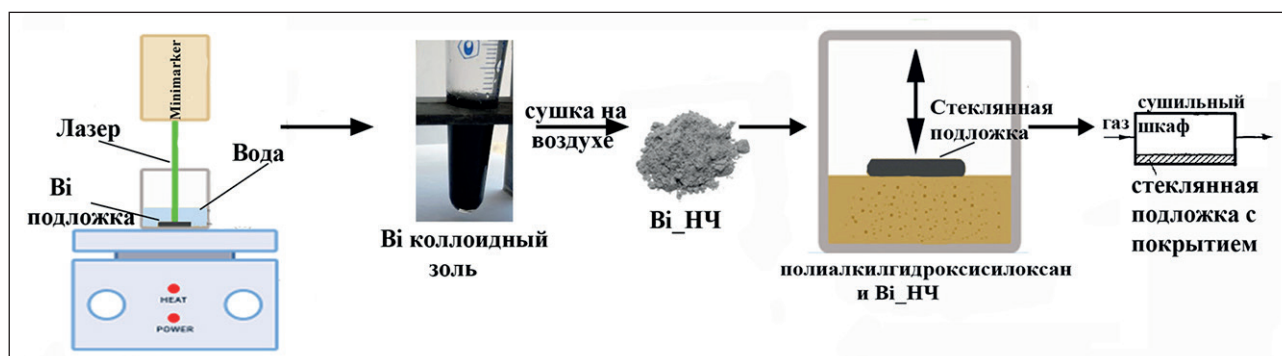


Рис. 1. Схема получения пленок оксида кремния, модифицированных наночастицами висмута

ность импульсов и время воздействия лазера подбирали с учетом оптимального размера частиц. Размер частиц контролировали с помощью прибора Zetatrac Microtrac Inc (США), работающего по принципу динамического рассеяния света. Данный прибор также позволяет получить информацию об электропроводности и электрокинетическом (ζ -) потенциале золей. Для характеристики свежеприготовленных золей Bi фиксировали среднее значение из 5 измерений, расхождение между данными для одного объекта исследования не превышало 1%.

Затем высушенный из полученного золя в воздушной среде при 80°C порошок Bi серовато-белого цвета добавляли в полиалкилгидроксисилоксановую жидкость (ООО «Поинт», г. Санкт-Петербург, Россия) и тщательно перемешивали. В полученную суспензию погружались стеклянные пластины для формирования на них пленки, после чего пластины извлекались и проходили термообработку в сушильной печи при непрерывном продувании разбавленным аргоном для исключения самовозгорания. Для исследования влияния условий отверждения гидроксисилоксанового полимера на состав и микроструктуру покрытия образцы подвергались термической обработке с плавным режимом набора температур до 300–500°C и выдержкой при заданной температуре в течение 1,5 часов.

Стеклянные подложки с полученным покрытием исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе TESCAN MIRA 3LMU со снятием энергодисперсионных рентгеновских спектров (ЭДС) в разных точках (микрообластях) встроенным спектрометром X-MAX 50 Oxford Instruments (TESCAN ORSAY HOLDING, Чехия).

Картины рентгеновской дифракции покрытий регистрировали с помощью дифрактометра ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific, США) с источником $CuK\alpha$ в диапазоне углов 2θ от 4° до 64° в режиме асимметричной компланарной съемки со скользящим углом падения $\alpha = 3^\circ$ (θ -scan) [7]. Фазовый анализ осуществляли с помощью программного обеспечения Crystallographica Search-Match Version 2.0.3.1 с использованием данных картотеки (PDF-4) международного центра дифракционных данных JCPDS.

ИК-спектры поглощения света регистрировали на спектрометре с Фурье-преобразованием Bruker

Optics GmbH в области волновых чисел 4000–400 cm^{-1} . Для этого образец покрытия растирали с бромидом калия (1:100) в агатовой ступке и получали полупрозрачные таблетки с помощью гидравлического пресса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате лазерной абляции пластины висмута в водной среде при варьировании длительности импульсов (P) и времени воздействия (t) получены коллоидные золи от светло-серого до темно-коричневого цвета. Данные дифференциального распределения частиц по размерам полученных золей представлены на рис. 2. Полученные частицы висмута во всех исследуемых режимах лазерного воздействия имеют нанометровый размер. Однако NPs Bi , полученные абляцией при длительности импульса $P = 4$ нс, характеризуются более широким распределением частиц по размерам по сравнению с режимом $P = 8$ нс, в котором получены более однородные частицы со средним диаметром 13...14 нм. В целом, полученные золи обладают относительно слабой устойчивостью и частицы седиментируют в водной среде уже через несколько часов.

Данные электропроводности и ζ -потенциала свежеприготовленного золя Bi (табл. 1) могут предположительно свидетельствовать об образовании

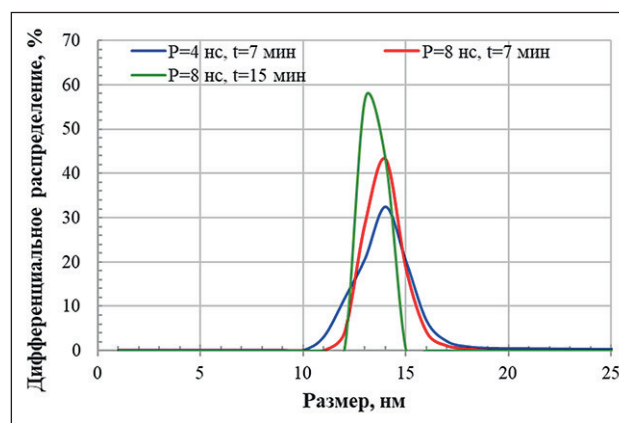


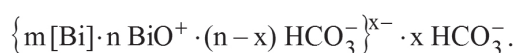
Рис. 2. Дифференциальное распределение частиц Bi по размерам, полученных при разных режимах лазерного воздействия

Таблица 1

Электропроводность и ζ -потенциал золей Bi , полученных при разных режимах лазерной абляции

Режим лазерного воздействия	Значение		
	$P = 4$ нс, $t = 7$ мин.	$P = 8$ нс, $t = 7$ мин.	$P = 8$ нс, $t = 15$ мин.
Электропроводность, мкСм/см	225	297	293
ζ -потенциал, мВ	+11,2	+14,5	+14,8

карбонатных фаз из микропузырьков воздуха водной среды при абляции мишени, так как висмут имеет большое сродство к углероду [24, 27]. Также определена электропроводность дистиллированной воды в присутствии пластины висмута до лазерного воздействия, которая составила 5 мкСм/см. Увеличение электропроводности после лазерной абляции доказывает присутствие в коллоидном золе ионов, что обеспечивает возникновение двойного электрического слоя (ДЭС) и потенциала на границе скольжения. На основании полученных данных и имеющихся в литературе сведений об образовании субкарбоната висмута при лазерной абляции в водной среде [24] выдвинуто предположение о строении мицелл, которое можно описать формулой:



Относительно низкие абсолютные значения ζ -потенциала (менее 25 мВ) не обеспечивают высокую устойчивость исследуемых дисперсных систем по электрокинетическому фактору.

На рис. 3 (а) показана структура пленки SiO_2 с внедренными НЧ Вi, отвержденной при 400°C

на поверхности стекла. Сформированное покрытие состоит из непрерывной пленки, плотно прилегающей к поверхности стеклянной подложки. Толщина покрытия составляет ~1 мкм. На поверхности покрытия содержатся локализованные мелкие частички Bi/SiO_2 . Элементный химический состав слоя был проверен с помощью измерений ЭДС в поперечном сечении (рис. 3 б, в). Виден непрерывный кремне-содержащий слой и внедренные в него маленькие частички Вi (светлые области). Размер частиц висмута в покрытии больше, чем средний размер НЧ, полученных при лазерной абляции, что связано с их агломерацией.

Увеличение температуры отверждения до 500°C приводит к разрушению пленки, появлению большого количества микротрещин. Однако, несмотря на растрескивание, покрытие имеет плотный контакт с подложкой (рис. 4). Появление микротрещин в покрытии связано с перераспределением молекул и изменением плотности пленки.

Для изучения деталей по взаимодействию компонентов при формировании покрытий сняты ИК-Фурье спектры образцов с различным составом, отвержденные при разных температурах (рис. 5–6).

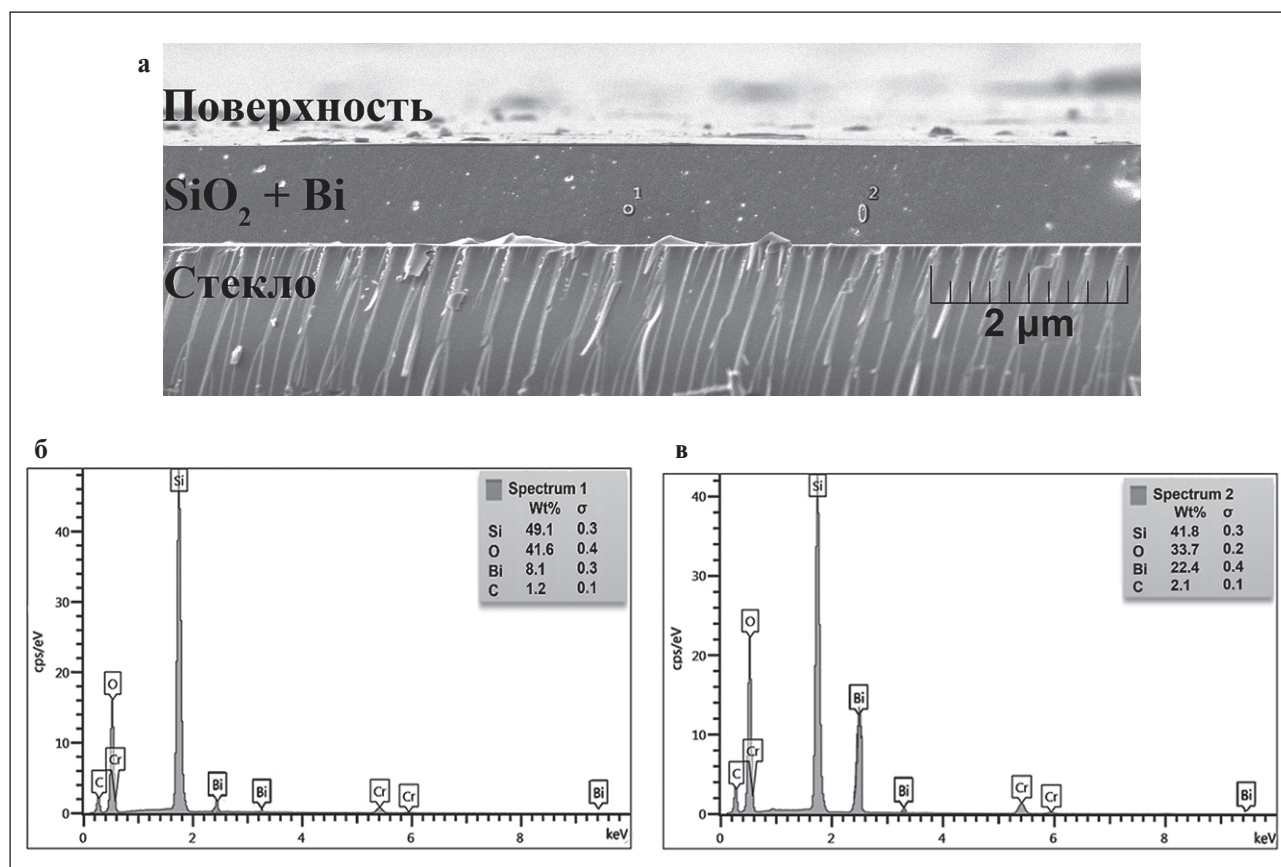


Рис. 3. СЭМ-изображение (вид сбоку) пленки SiO_2 с внедренными НЧ Вi, отвержденной при 400°C (а), ЭДС-спектры в точке 1 (б) и точке 2 (в)

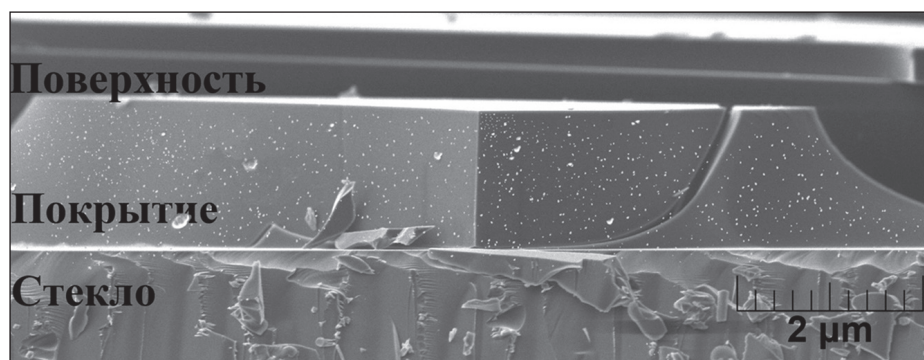


Рис. 4. СЭМ-изображение (вид сбоку) пленки SiO_2 с внедренными НЧ Bi, отвержденной при 500°C

В спектре покрытия, полученного из чистого полиалкилгидроксисилоксана при 400°C (рис. 5а),

присутствуют полосы, характерные для аморфного кремнезема [6].

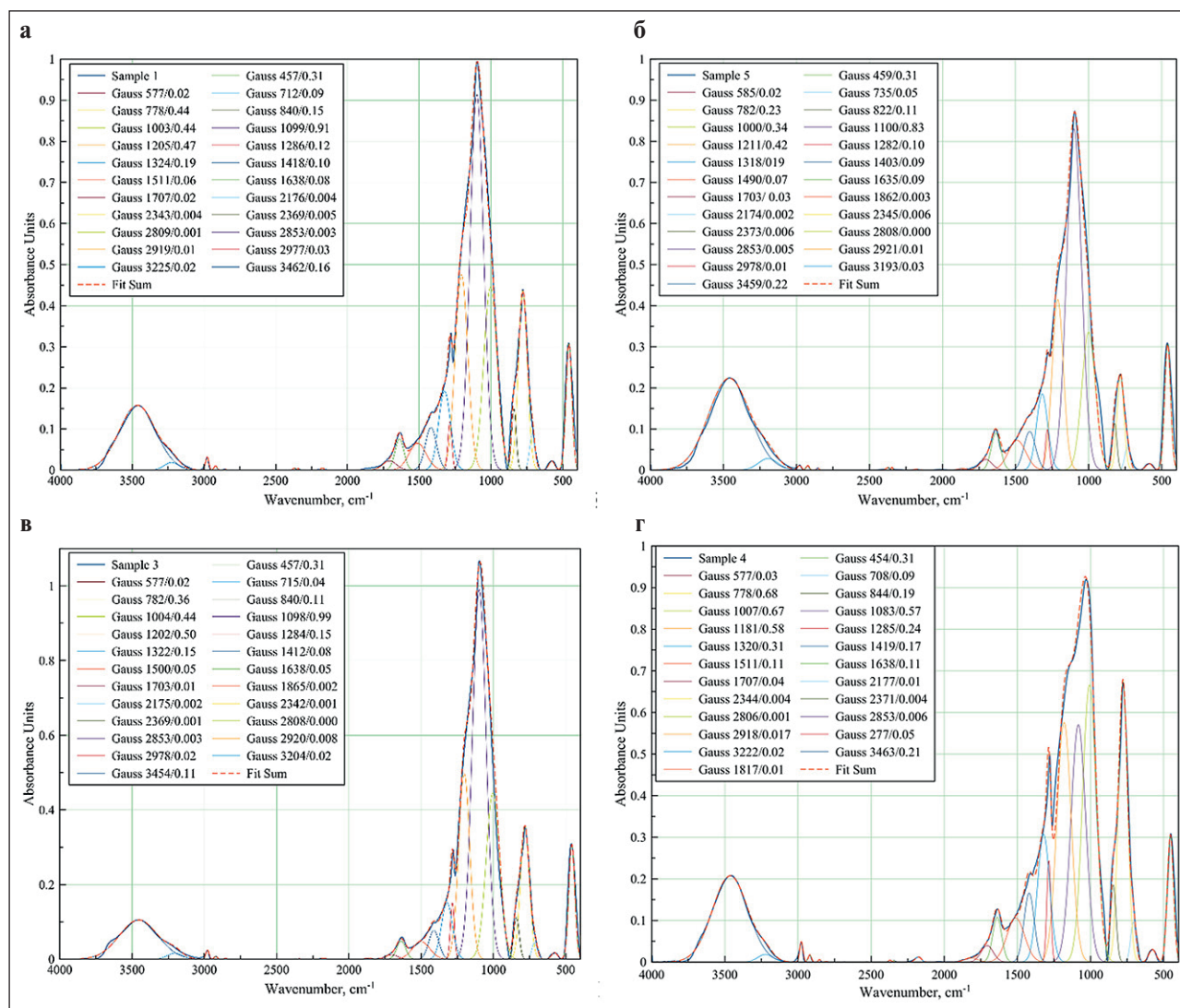


Рис. 5. ИК-Фурье спектры пленок различного состава, отвержденные при 400°C : 100% полиалкилгидроксисилоксан (а); 0,5% масс. НЧ Bi (б); 1% масс. НЧ Bi (в); 3% масс. НЧ Bi (г)

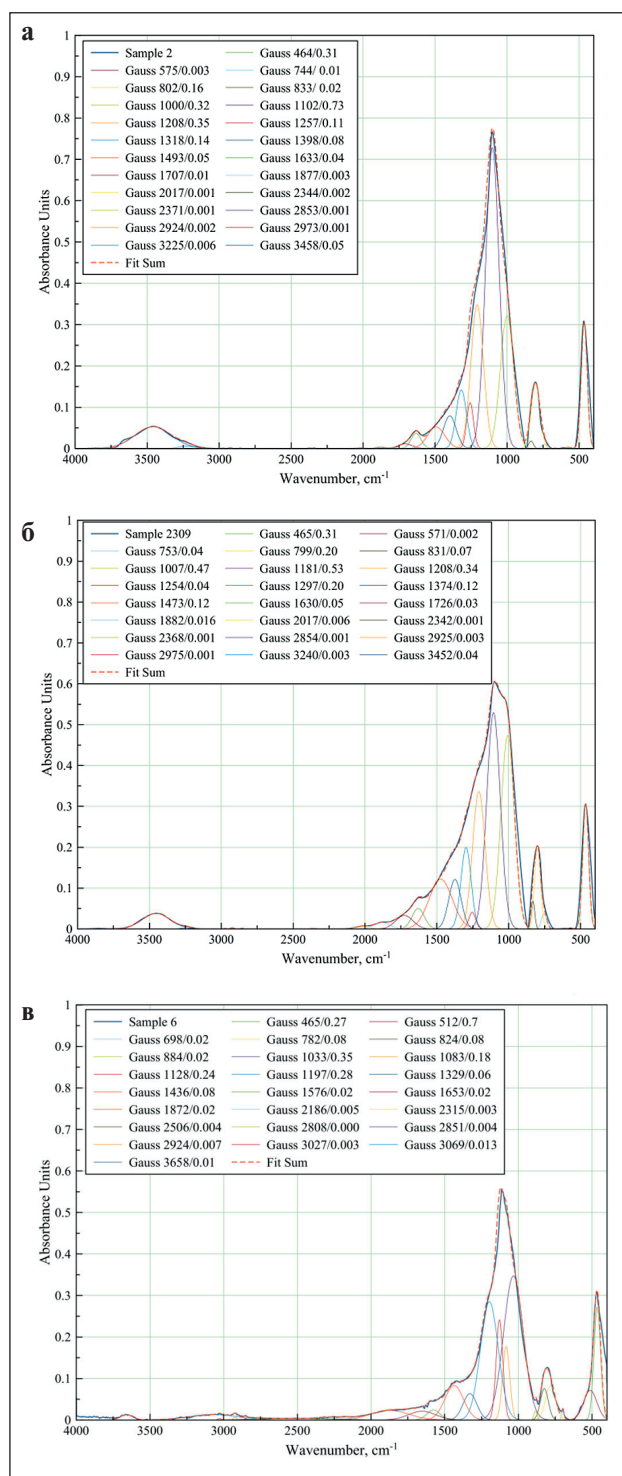


Рис. 6. ИК-Фурье спектры пленок различного состава, отвержденные при 500°C: 100% полиалкилгидроксисилоксан (а); 3% масс. НЧ Bi (б); 10% масс. НЧ Bi (в)

Полосы поглощения с вершиной 460 см⁻¹ соответствует деформационным δ -колебаниям Si—O связей тетраэдра SiO₄. Данная полоса характерна для

всех образцов и всех модификаций SiO₂, поэтому используется в качестве среднего стандарта.

Широкие полосы в интервале 660–890 и 890–1200 см⁻¹ связаны с симметричными ν_s и асимметричными ν_{as} колебаниями связей Si—O.

Видно, что полосы очень близко располагаются друг к другу, накладываются. При изменении состава и режима температурной обработки образцов наблюдается изменение формы широких спектров. Поэтому для более детальной оценки перераспределения интенсивности полос и перестройки молекул спектры были разложены на Гауссовы кривые. Суммарная линия (Fit Sum) всех Гауссовых кривых практически повторяет линию исходного ИК-спектра. В легенде к каждой Гауссовой кривой приведены координаты вершины пика: волновое число (см⁻¹) и интенсивность поглощения. Расщепление полос поглощения на Гауссианы позволяет увидеть наличие нескольких структурных видов молекулярных фаз.

Так, широкую полосу в интервале 660–890 см⁻¹ можно разложить на три Гауссовы кривые. Например, у образца из чистого полиалкилгидроксисилоксана, термообработанного при 400°C (рис. 5а), эти кривые характеризуются вершинами 712, 778 и 840 см⁻¹. Гауссиана с вершиной 712 см⁻¹, по-видимому, связана с неполным разложением органических соединений, поскольку после термообработки она смещается в высокочастотную область до 744 см⁻¹ (рис. 6а). Внедрение частиц висмута в образец также смещает данную Гауссиану (рис. 5б–г), что связано с наложением полос деформационных колебаний для связи Si—O—Bi. Гауссианы 778 и 840 см⁻¹ более стабильны при внедрении НЧ Bi, вершина практически не смещается, изменяется только интенсивность: с увеличением содержания Bi увеличивается интенсивность (рис. 5б–г). Однако термическая обработка при 500°C несколько смещает данные вершины до 800 и 830 см⁻¹ соответственно (рис. 6б). В литературе данными волновыми числами характеризуют симметричные валентные колебания связей Si—O и Si—OH [6].

Гауссианы 1000, 1100 и 1200 см⁻¹ относятся к полосе асимметричных валентных колебаний связи Si—O—Si тетраэдров SiO₄. С увеличением содержания Bi в образцах интенсивность этих Гауссиан увеличивается (рис. 5), но неравномерно: в большей степени увеличивается Гауссиана с вершиной 1000 см⁻¹. Это сказывается на изменении формы суммарного пика. По всей видимости, полученные данные свидетельствуют об определенных изменениях структуры расположения молекул в ближнем порядке.

Полоса в диапазоне 540–620 см⁻¹ наблюдается у всех образцов, термообработанных при 400°C (рис. 5), и может быть отнесена к C—H связи. Это

свидетельствует о неполном разложении полиалкилгидроксисилоксана при данных условиях термообработки. У термообработанных при 500°C пик в области 540–620 см^{-1} не обнаружен (рис. 6а–б). То же самое характерно и для полосы 1286 см^{-1} , соответствующей связи Si–CH₃. Однако можно заметить, что с увеличением содержания НЧ Вi в образцах, термообработанных при 400°C, увеличивается и интенсивность полосы ~1283 см^{-1} , что свидетельствует об увеличении доли углеводородного остатка в продукте.

В образцах с добавлением НЧ Вi замечена слабая полоса 1832–1872 см^{-1} , вызванная симметричным искривлением и растяжением Si–O связей. В образцах, состоящих из полиалкилгидроксисилоксана, данной полосы не обнаружено.

Несмотря на относительно высокую температуру обработки (400°C), во всех образцах (рис. 5) присутствует вода, что подтверждается наличием полос поглощения в области 1630 см^{-1} (деформационные колебания молекул воды), 2808–2850 см^{-1} (связаны с водородными связями), 3100–3600 см^{-1} (колебания O–H в молекуле воды). Обработка при температуре 500°C (рис. 6а–б) снижает интенсивность полос, характерных для колебаний молекул воды, но не убирает их полностью.

Поскольку малое количество наночастиц Вi (до 3% масс.) в образце не позволяет идентифицировать отдельные полосы, характерные для колебаний висмутовых связей, сняты ИК-спектры образца с содержанием NPs Вi 10% масс. (рис. 6в). Видно, что полоса с вершиной 466 см^{-1} , соответствующая δ -колебаниям Si–O связей, расширена и накладывается на полосу в области 510–540 см^{-1} , характеризующей деформационные колебания Si–O–Bi. Также наблюдаются слабые полосы в области 698 см^{-1} (вызванная колебанием Bi–O связей в BiO₃ и BiO₆ структурных единицах) и 884 см^{-1} (колебания Si–O–Bi) [28].

Для исследования присутствия кристаллических фаз использовали метод рентгеновской дифракции (рис. 7).

Результаты рентгенографии свидетельствуют о том, что покрытие, полученное из чистого полиалкилгидроксисилоксана, вне зависимости от температурного режима обработки характеризуется полностью аморфной структурой. Это подтверждает наличие на рентгенограмме аморфного гало в диапазоне углов 2θ 10–20°. При получении покрытия из полиалкилгидроксисилоксана с добавлением NPs Вi (до 3% масс.) наблюдается уширение аморфного гало, что может быть связано с наличием следов мелкокристаллической фазы. Большее содержание (10% масс.) наночастиц висмута в покрытии приводит к появлению пиков на рентгенограмме, что доказывает наличие в системе микрокристаллических фаз силикатов висмута.

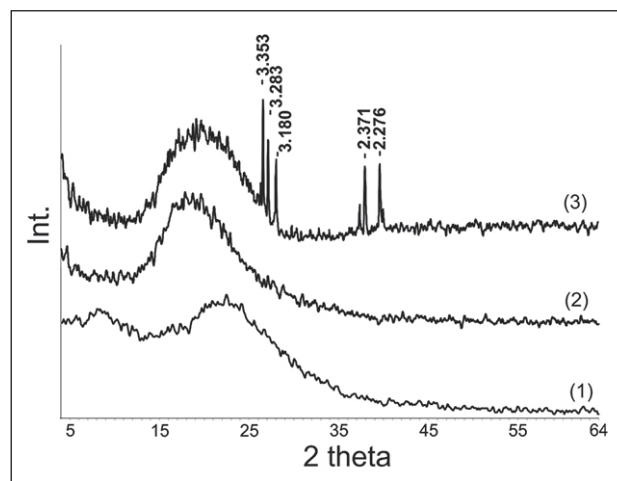


Рис. 7. Рентгенограммы покрытий, содержащих: 1 – полиалкилгидроксисилоксан; 2 – 3% масс. НЧ Вi; 3 – 10% масс. НЧ Вi

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом лазерной абляции металлического висмута в водной среде получены частицы, имеющие нанометровый размер. Показано, что лазерная абляция висмута способствует получению золя, в котором возникает двойной электрический слой (ДЭС) и потенциал на границе скольжения. Однако для полученных золь висмута не характерна устойчивость по электрокинетическому фактору.

Установлена возможность получения пленки из жидкости полиалкилгидроксисилоксана в присутствии наноразмерных частиц висмута. При оптимальном температурном режиме сушки (до 400°C), несмотря на агрегирование частиц висмута, удается получить непрерывную, равномерную, плотно прилегающую к поверхности стеклянной подложки пленку.

Детальный анализ ИК-спектров покрытий с разным содержанием наночастиц висмута показал, что добавление НЧ Вi в малом количестве (до 3% масс.) и режим термической обработки влияют на ближний порядок молекулярных связей. Но при этом полосы поглощения, характерные для кристаллических силикатных фаз, не появляются. Повышение содержания наночастиц висмута в покрытии до 10% масс. способствует появлению полос, характеризующих деформационные колебания Si–O–Bi. и колебания Bi–O связей в BiO₃ и BiO₆ структурных единицах.

Рентгенофазовый анализ подтвердил данные ИК-спектроскопии, что содержание наночастиц висмута в покрытии из полиалкилгидроксисилоксана более 10% масс. приводит к появлению в системе микрокристаллических фаз силикатов висмута. При внедрении малого количества висмута (3% масс.) образование кристаллических фаз не происходит.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Valtchev V.P., Faust A.C., Lézervant J. Rapid synthesis of silicalite-1 nanocrystals by conventional heating. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2004; 68: 91–95. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2003.11.018>
2. Post P., Wurlitzer L., Maus-Friedrichs W., Weber A.P. Characterization and applications of nanoparticles modified in-flight with silica or silica-organic coatings. *Nanomaterials*. 2018; 8(7): 530. <https://doi.org/10.3390/nano8070530>
3. Привезенцев В.В., Куликаускас В.С., Затекин В.В., Киселев Д.А., Воронова М.И. Исследование мемристоров на основе пленок оксида кремния, имплантированных цинком // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2022. 6. 96–102. <https://doi.org/10.31857/S1028096022060140>
4. Privezentsev V.V., Sergeev A.P., Firsov A.A., Kulikauskas V.S., Yakimov E.E., Kirilenko E.P., Goryachev A.V. Study of Zn implanted silicon oxide films. *Physics of the Solid State*. 2023; 4: 679–684. <https://doi.org/10.21883/PSS.2023.04.56013.17>
5. Pakuła D., Marciniak B., Przekop R.E. Direct Synthesis of Silicon Compounds—From the Beginning to Green Chemistry Revolution. *AppliedChem* 2023; 3: 89–109. <https://doi.org/10.3390/appliedchem3010007>
6. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Edamenko O.D., Yastrebinsky R.N., Noskov A.V., Prokhorenkov D.S., Gorodov A.I., Piskareva A.O. Synthesis and Characterization of Silicon–Carbon Powder and Its Resistance to Electron Irradiation. *Journal of Composites Science*. 2023; 7: 340. <https://doi.org/10.3390/jcs7080340>
7. Cherkashina, N.I.; Pavlenko, V.I.; Zaitsev, S.V.; Gorodov, A.I.; Domarev, S.N.; Sidelnikov, R.V.; Romanyuk, D.S. Adhesion Strength of Al, Cr, In, Mo, and W Metal Coatings Deposited on a Silicon–Carbon Film. *Coatings* 2023; 13: 1353. <https://doi.org/10.3390/coatings13081353>
8. Скородумова О.Б., Семченко Г.Д., Гончаренко Я.Н., Толстой В.С. Кристаллизация SiO₂ из гелей на основе этилсиликата // *Стекло и керамика*. 2001. 74(1). 31–33. <https://doi.org/10.1023/a:1010933028152>
9. Oehler J.H. Hydrothermal crystallization of silica gel. *Geological Society of America Bulletin*. 1976; 87: 1143–1152. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87%3C1143:HCOSG%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87%3C1143:HCOSG%3E2.0.CO;2)
10. Kishore R., Sood K., Naseem H. Microstructural and analytical investigation of low temperature crystallized amorphous silicon/crystallized silicon interface using SEM and EDS. *Journal of Materials Science Letters*. 2002; 21: 647–648. <https://doi.org/10.1023/A:1015600423981>
11. Kioseoglou J., Komninou P., Dimitrakopoulos G.P., Antoniadis I. P., Hatalis M. K., Karakostas Th. Crystallization of amorphous silicon thin films: comparison between experimental and computer simulation results. *Journal of Materials Science*. 2008; 43: 3976–3981. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2226-1>
12. Huang J., Zhang P., Wang X., Luo L., Gao J., Peng C., Liu X. Crystallization of inorganic silica based on interaction between polyimide and silica by sol–gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2013; 66: 193–198. <https://doi.org/10.1007/s10971-013-2989-6>
13. Nast O., Brehme S., Neuhaus D.H., Wenham S. R. Polycrystalline silicon thin films on glass by aluminum-induced crystallization. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1999; 10: 2062–2068. <https://doi.org/10.1109/16.791997>
14. Hossain M., Meyer H.M., Abu-Safe H.H., Naseem H., Brown W.D. Large-grain poly-crystalline silicon thin films prepared by aluminum-induced crystallization of sputter-deposited hydrogenated amorphous silicon. *Journal of Materials Research*. 2006; 21: 761–766. <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0091>
15. Schneider J., Schneider A., Sarikov A., Klein J., Muske M., Gall S., Fuhs W. Aluminum-induced crystallization: Nucleation and growth process. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006; 352(9–20): 972–975. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2005.09.036>
16. Knaepen W., Detavernier C., Van Meirhaeghe R.L., Jordan Sweet J., Lavoie C. In-situ X-ray Diffraction study of Metal Induced Crystallization of amorphous silicon. *Thin Solid Films*. 2008; 516(15): 4946–4952. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.09.037>
17. Wang T., Yan H., Zhang M., Song X., Pan Q., He T., Hu Z., Jia H., Mai Y. Polycrystalline silicon thin films by aluminum induced crystallization of amorphous silicon. *Applied Surface Science*. 2013; 264: 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.09.019>
18. Zouini M., Ouertani R., Amlouk M., Dimassi W. Annealing Temperature Effect on Bismuth Induced Crystallization of Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Films. *Silicon*. 2022; 14: 2115–2125. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01005-7>
19. Kaito C., Kumamoto A., Saito Y., Ono R. Low-temperature crystallization of thin silicate layer on crystalline Fe dust. *Earth, planets and space*. 2010; 62: 29–31. <https://doi.org/10.5047/eps.2008.10.002>
20. Wang W., Huang J., Lu Y., Yang Y., Song W., Tan R., Dai S., Zhou J. In situ micro-Raman spectroscopic study of laser-induced crystallization of amorphous silicon thin films on aluminum-doped zinc oxide substrate. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2012; 23: 1300–1305. <https://doi.org/10.1007/s10854-011-0588-2>

21. Hassan S.S., Hubeatir K.A., Al-haddad R.M.S. Characterization and antibacterial activity of silica-coated bismuth (Bi@SiO_2) nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation in liquid. *Optik (Stuttg)*. 2023; 273: 170453. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170453>
22. Song Y.H., Kang S.Y., Cho K.I., Yoo H.J., Kim J.H., Lee J.Y. Polycrystalline Silicon Films Formed by Solid-Phase Crystallization of Amorphous Silicon: The Substrate Effects on Crystallization Kinetics and Mechanism. *MRS Online Proceedings Library*. 1996; 424: 243–248. <https://doi.org/10.1557/PROC-424-243>
23. Kioseoglou J., Komninou P., Dimitrakopoulos G.P., Antoniadis I.P., Hatalis M.K., Karakostas T. Crystallization of amorphous silicon thin films: comparison between experimental and computer simulation results. *J Mater Sci*. 2008; 43: 3976–3981. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2226-1>
24. Golubovskaya A.G., Fakhrutdinova E.D., Svetlichnyi V.A. Bismuth silicates: preparation by pulsed laser ablation and photocatalytic activity. *Proc. SPIE 12086, XV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications*. 2021: 120861Y. <https://doi.org/10.1117/12.2612743>
25. Belik Y.A., Vodyankin A.A., Fakhrutdinova E.D., Svetlichnyi V.A., Vodyankina O.V. Photoactive bismuth silicate catalysts: Role of preparation method. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2022; 425: 113670. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113670>
26. Shabalina A.V., Fakhrutdinova E.D., Golubovskaya A.G., Kuzmin S.M., Koscheev S.V., Kulinich S.A., Svetlichnyi V.A., Vodyankina O.V. Laser-assisted preparation of highly-efficient photocatalytic nanomaterial based on bismuth silicate. *Applied Surface Science*. 2022; 575: 151732. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151732>
27. Ortiz-Quinonez J.L., Vega-Verduga C., Díaz D., Zumeta-Dubé I. Transformation of Bismuth and $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ Nanoparticles into $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ and $(\text{BiO})_4(\text{OH})_2\text{CO}_3$ by Capturing CO_2 : The Role of Halloysite Nanotubes and “Sunlight” on the Crystal Shape and Size. *Crystal Growth & Design*. 2018; 18(8): 4334–4346. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.8b00177>
28. Yastrebinskii R.N., Pavlenko A.V., Bondarenko G.G. Structural Features of Mineral Crystalline Phases and Defectiveness of Bismuth Organosilicate Crystals at High Temperatures. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018; 9(5): 825–831. <https://doi.org/10.1134/S2075113318050313>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павленко Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; Белгород, Россия, belpavlenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3464-1880>

Городов Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, gorodov-andreyu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5530-3282>

Ястребинский Роман Николаевич – доктор технических наук, директор химико-технологического института, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, yrndo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6413-0002>

Лебедев Михаил Сергеевич – старший научный сотрудник кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия; Научно-образовательный центр «Аддитивные технологии», Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, michael1987@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3194-9238>

Кашибадзе Виталий Валерьевич – аспирант кафедры теоретической и прикладной химии, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия, vitaliy.kashibadze@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2246-6605>

ВКЛАД АВТОРОВ

Павленко В.И. – научное руководство, постановка целей и задач исследования, формальный анализ результатов исследования.

Городов А.И. – проведение экспериментальной части исследования, анализ результатов исследования, написание оригинального текста статьи.

Ястребинский Р.Н. – разработка методологии исследования, концепция исследования, доработка текста статьи.

Лебедев М.С. – проведение экспериментальной части исследования, обработка результатов исследования.

Кашибадзе В.В. – проведение экспериментальной части исследования, обработка данных, редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023; одобрена после рецензирования 05.10.2023; принята к публикации 10.10.2023.