

коэффициентов отражений и пропусканий была оценена мощность лазерного излучения на выходе из оптической системы на измерительную линию – 3 мВт и мощность лазерного излучения на входе в оптическую систему с измерительной линией – 0,02 мВт.

Полученные результаты подтверждают возможность применения разрабатываемой оптической системы в исследуемом диапазоне длин.

Проведена серия измерений по оценке работоспособности системы на дистанции до 65 м в лабораторных условиях – система успешно произвела настройку на отражатель (ретрорефлектор).

Проведена серия измерений по оценке работоспособности системы на дистанции до 607 м в полевых условиях в солнечный летний – система успешно произвела настройку на отражатель (ретрорефлектор).

В результате предварительных испытаний САПОЛ до 607 м отработала штатно, однако потребовалось вмешательство оператора для точной подстройки системы в ручном режиме.

Для макета эталонного дальномера на основе фемтосекундного лазера в диапазоне длин 2,5 м до 1000 м была предложена и реализована система автоматического поиска отраженного луча, которая показала свою работоспособность на дистанции до 607 м, однако при увеличении измерительной дистанции потребуются дополнительные исследования и доработки системы. Использование САПОЛ позволяет существенно упростить и снизить время

подготовки и настройки макета МКИДФЛ к проведению измерений приблизительно с трех часов до 30 минут. Данная система в дальнейшем позволит применять метрологический комплекс измерения длины на основе фемтосекундного лазера в области координатных измерений.

#### Литература

1. Sokolov, D.A. The reference range finder based on the femtosecond laser for the length measurement in the range up to 60 m. / D.A. Sokolov // Design and application, proceedings of VII International Competition of COOMET «Best Young Metrologist». – 2017.
2. Leica MS60/TS60 Руководство пользователя. – С. 88 – 95.
3. Козаченков, С.А. Результаты исследования перспективного метрологического комплекса измерения длины в условиях промежуточной прецизионности / С.А. Козаченков // Приборостроение – 2022: Материалы 15-й международной научно-технической конференции. Минск, Республика Беларусь. БНТУ. – 2022. – С. 162–164.
4. Способ воспроизведения единицы длины в лазерных дальномерах на основе интерферометра Майкельсона : патент РФ № 2698699 / С.А. Губин, Д.А. Соколов, В.М. Татаренков. – Оpubл. 29.08.2019.
5. Соколов, Д.А., Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины в диапазоне 24 м – 4000 км (ГПСЭД) / Д.А. Соколов, О.М. Олейник-Дзядик, И.С. Сильвестров // Труды института прикладной астрономии РАН. – 2020. – № 52. – С. 63–67.

УДК 666. 76:54.057

### КЕРАМИКА ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА Таратын И.А.<sup>1</sup>, Колонтаева Т.В.<sup>1</sup>, Дятлова Е.М.<sup>2</sup>, Хорт А.А.<sup>2</sup>, Бука А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Разработаны и получены новые материалы на основе модифицированного титаната бария с заданным комплексом электрофизических и эксплуатационных свойств для чувствительных элементов датчиков диоксида углерода.

**Ключевые слова:** сегнетокерамика, титанат бария, высокотемпературное спекание, осаждение.

### CERAMICS FOR SENSITIVE ELEMENTS OF CARBON DIOXIDE SENSORS

Taratyn I.<sup>1</sup>, Kolontaeva T.<sup>1</sup>, Dyatlova E.<sup>2</sup>, Khort A.<sup>2</sup>, Buka A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

<sup>2</sup>Belarusian State Technological University  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** New materials based on modified barium titanate with a given set of electrophysical and operational properties for sensitive elements of carbon dioxide sensors have been developed and obtained.

**Key words:** ferroceramics, barium titanate, high-temperature sintering, precipitation.

Адрес для переписки: Таратын И.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: bntu@bntu.by

В настоящее время требуется постоянный контроль содержания углекислого газа в различных сферах деятельности человека (рабочее пространство, окружающая среда и др.). Усиленный

контроль за концентрацией CO<sub>2</sub> осуществляется в выбросах предприятий. К газовым сенсорам предъявляется ряд требований, таких как высокая чувствительность, быстродействие, надежность.

Полупроводниковые керамические материалы на основе модифицированного титаната бария обладают необходимым комплексом физико-технических и электрофизических характеристик, которые позволяют использовать материал для создания датчиков углекислого газа.

Целью данного исследования является разработка составов и технологии синтеза керамики для чувствительных элементов датчиков  $\text{CO}_2$ .

Для синтеза сегнетокерамики, методом высокотемпературного спекания (ВС), на основе модифицированного титаната бария применялись следующие материалы квалификации ХЧ:  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$  и  $\text{La}_2\text{O}_3$  в количестве  $\text{BaTiO}_3$  к  $\text{CuO}$  1:1 и сверх 100 мас. % вводилось 1, 3, 5 мас. % оксида лантана. Исходная смесь в заданном соотношении подвергалась совместному сухому помолу в шаровой мельнице, затем шихта спекалась при температуре  $1250^\circ\text{C}$  с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. После обжига материал подвергался повторному измельчению в шаровой мельнице.

Для синтеза керамики методом химического осаждения (ХО) использовались хлориды квалификации ЧДА: бария, титана, меди и лантана. В качестве растворителя применялись дистиллированная вода и этиловый спирт, в роли осадителя использовалась щавелевая кислота. Для получения модифицированного титаната бария вначале были приготовлены водные растворы хлоридов исходных компонентов с концентрациями, обеспечивающими полную стехиометрию протекания синтеза. Также подготовлен раствор щавелевой кислоты в 50%-ном избытке по отношению к необходимому для полного осаждения компонентов конечного раствора. Раствор хлорида титана подавался в водно-спиртовой раствор при постоянном перемешивании, затем в полученный раствор добавлялись другие компоненты, а также спирт, необходимый для сохранения прежнего соотношения вода/спирт. После смешивания исходных компонентов добавлялся раствор щавелевой кислоты, полученная суспензия подвергалась фильтрации и промывке раствором аммиачной и дистиллированной воды до получения нейтральной или слабощелочной среды. Осадок подвергался сушке и прокаливанию при температуре  $900^\circ\text{C}$  с выдержкой при максимальной температуре 1 ч.

Из полученных керамических порошковготавливалась водная суспензия, которая наносилась на кристалл анодированного алюминия с платиновыми электродами, затем происходило вжигание в электрической печи при температуре  $850^\circ\text{C}$  в течении 5 ч. После отжига кристалл подвергался монтажу в корпус сенсора.

Результаты рентгенофазового анализа подтверждено, что немодифицированный  $\text{BaTiO}_3$ , полученный методом высокотемпературного спекания, является монофазным. Экстремум

дифракционного максимума находится при  $2\theta = 32$  и  $45^\circ$ . С введением оксида меди (II) наблюдается снижение интенсивности основного рефлекса титаната бария, также происходит расщепление пика при  $45^\circ$ , что свидетельствует об увеличении степени тетрагональности перовскитовой кристаллической решетки, имеются рефлексы, связанные со свободным (непрореагировавшим) оксидом меди (II). Введение оксида лантана способствует кристаллизации новой фазы с формулой  $\text{Ba}_{0,95}\text{Cu}_{0,05}\text{La}_{0,05}\text{TiO}_3$ , которая обладает меньшей степенью тетрагональности перовскитовой структуры, также происходит увеличение рефлексов в области  $2\theta = 32$  и  $45^\circ$  и снижение расщепления рефлексов при  $2\theta = 45^\circ$ . При синтезе методом химического осаждения рентгенофазовый анализ показал, что основной фазой является  $\text{Ba}_{0,95}\text{Cu}_{0,05}\text{La}_{0,05}\text{TiO}_3$ , также присутствуют максимумы, относящиеся к свободному  $\text{CuO}$ .

С помощью электронной микроскопии оценена микроструктура полученных материалов. Керамика, полученная методом химического осаждения из растворов, характеризуется большей дисперсностью и однородностью, чем материал, полученный методом (ВС), это обусловлено способом синтеза, т. к. при и осаждении применяются высокодисперсные и более однородные по составу прекурсоры. Метод химического осаждения способствует получению материала с более высокими эксплуатационными характеристиками. На рисунке 1 изображена микроструктура, полученная методом электронной микроскопии, модифицированного  $\text{BaTiO}_3 + \text{CuO}$  (1:1) с добавлением 5 мас. % оксида лантана.



а



б

Рисунок 1 – Электронные снимки модифицированного  $\text{BaTiO}_3 + \text{CuO}$  (1:1), дополнительно содержащий 5 мас. %  $\text{La}_2\text{O}_3$  ((а) – метод (ВС); (б) – метод (ХО))

Проведено исследование по изучению удельного объемного электрического сопротивления керамики в зависимости от частоты измерения. Немодифицированный  $\text{BaTiO}_3$ , полученный

двумя методами характеризовался удельным электрическим сопротивлением равным  $12 \cdot 10^9$  Ом·м при частоте 25 Гц. С увеличением частоты тока (1 кГц) сопротивление стало снижаться и составило 11 (BC) и  $10 \cdot 10^9$  Ом·м (ХО), при 50 кГц  $\rho_v = 4,5$  и  $3,8 \cdot 10^9$  Ом·м соответственно. Уменьшение сопротивления с увеличением частоты тока связано с трудностью поляризации материала, диполи не успевают переориентироваться в пространстве, тем самым не вносят значительный вклад в электрическое сопротивление материала. С увеличением содержания оксида лантана в керамике наблюдается снижение значений удельного объемного электрического сопротивления, это связано с тем, что  $\text{La}_2\text{O}_3$  приводит к изменению электронной структуры керамики. Синтезированный керамический материал в системе  $\text{BaTiO}_3 - \text{CuO} - \text{La}_2\text{O}_3$  обладает искаженной перовскитовой структурой, т. к. в решетке происходит замещение ионов титаната бария ионами меди и лантана, при замещении бария лантаном образуется валентный электрон. Для компенсации ион  $\text{Ti}^{4+}$  переходит в  $\text{Ti}^{3+}$ . Таким образом в связи с данными переходами уменьшается электрическое сопротивление материала, за счет подвижных электронов, которые легко перемещаются под действием электрического поля.  $\text{CuO}$  образует тонкий поверхностный слой на зернах  $\text{BaTiO}_3$ . Данные материалы имеют разные типы

проводимости ( $p$  и  $n$  соответственно), сочетание вышеуказанных факторов приводит к возникновению энергетических уровней вблизи поверхности раздела фаз п.п./газ, что способствует улучшению сенсорных свойств и эксплуатационных характеристик материала.

В ходе работы было установлено, что датчики полученные на основе модифицированного титаната бария обладают повышенной чувствительностью, малым временем детектирования и релаксации. Эксплуатационные характеристики газового сенсора  $\text{CO}_2$  с чувствительным элементом из разработанного керамического материала: коэффициент чувствительности к углекислому газу 1,25–1,29; коэффициент чувствительности к  $\text{CO}$  1–0,7; время детектирования составляет от 40 до 60 с; время релаксации 90–120 с; рабочая температура 20–25 °С.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что чувствительные элементы газовых  $\text{CO}_2$  на основе модифицированного  $\text{BaTiO}_3$  (ионы-модификаторы –  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{La}^{3+}$ ), обладают повышенной чувствительностью, сниженным временем детектирования и релаксации, а также являются достаточно стабильными.

#### Литература

1. Min-Suk Lee, Jërg-Uwe Meyer // A new process for fabrication  $\text{CO}_2$  – sensing layers based on  $\text{BaTiO}_3$  and additives // Sensor and Actuators B68(2000)293-299.