

УДК 66.091/046.516:546.34'883'21

ЗОЛЬ–ГЕЛЬ-СИНТЕЗ ЛЕГИРОВАННОЙ ЦИНКОМ ШИХТЫ ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ

© 2020 г. С. М. Маслбоева¹, *, М. Н. Палатников¹, Л. Г. Арутюнян¹

¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева – обособленное подразделение ФИЦ “Кольский научный центр Российской академии наук”,
Академгородок, 26а, Апатиты, 184209 Россия

*e-mail: sofia_masloboeva@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2019 г.

После доработки 22.08.2019 г.

Принята к публикации 17.09.2019 г.

Разработан метод синтеза легированной цинком шихты танталата лития (LiTaO_3) из высокочистых танталсодержащих растворов, основанный на термической обработке цитратных литий-, тантал- и цинксодержащих прекурсоров. Продукты термолитиза исследованы методами термического, рентгенофазового анализов и инфракрасной спектроскопии поглощения. Определены оптимальные условия синтеза и концентрация цинка, при которых получается однофазная шихта $\text{LiTaO}_3\langle\text{Zn}\rangle$. По предлагаемой технологической схеме получены образцы шихты $\text{LiTaO}_3\langle\text{Zn}\rangle$ с заданной концентрацией легирующей примеси, которые могут быть использованы как в технологии выращивания кристаллов $\text{LiTaO}_3\langle\text{Zn}\rangle$, так и при получении функциональной керамики на основе легированного танталата лития.

Ключевые слова: синтез, танталат лития, шихта, легирование, прекурсоры

DOI: 10.31857/S0002337X20030124

ВВЕДЕНИЕ

Ниобат и танталат лития (LiNbO_3 и LiTaO_3) относятся к важнейшим сегнетоэлектрическим, оптическим, пьезоэлектрическим и пироэлектрическим материалам [1–4], интерес к которым привлекает внимание многочисленных исследователей [5–13]. При этом кристаллы LiTaO_3 изоморфны по отношению к кристаллам LiNbO_3 . Как и ниобат лития, танталат лития является фазой переменного состава с широкой областью гомогенности [1–4]. Причем состав конгруэнтного плавления в обеих фазах весьма существенно не совпадает со стехиометрическим составом, при котором отношения Li/Nb и Li/Ta равны единице [1, 2]. В связи с этим кристаллы ниобата и танталата лития обладают сходным типом дефектной структуры и практически одинаково изменяют свои характеристики при легировании [1–3]. В то же время, кристаллы LiNbO_3 изучены в литературе гораздо шире, чем кристаллы LiTaO_3 [1–13]. Так, активный поиск стойких к оптическому повреждению материалов инициировал интерес к исследованию сильно легированных кристаллов LiNbO_3 . Эти исследования показали, что при высоких концентрациях (~4.0–9.0 мол. % МО в расплаве) нефоторефрактивных примесей (M – Mg, Zn, Sc и др.) происходит радикальное подавление фоторефрактивного

эффекта в кристаллах LiNbO_3 [3]. Логично полагать, что легирование кристаллов LiTaO_3 нефоторефрактивными примесями (Mg, Zn и др.), как и в кристаллах LiNbO_3 , существенно повысит их оптическую стойкость, что позволит существенно расширить область практических приложений. Следует также ожидать, что легирование цинком шихты LiTaO_3 , по аналогии с шихтой $\text{LiNbO}_3\langle\text{Zn}\rangle$, существенно понизит низкотемпературную ($T \leq 450$ K) электронную проводимость керамики $\text{LiTaO}_3\langle\text{Zn}\rangle$. В свою очередь, существенное снижение низкотемпературной электронной проводимости керамики $\text{LiTaO}_3\langle\text{Zn}\rangle$ позволит более эффективно провести ее поляризацию и тем самым значительно улучшить акустические и пьезоэлектрические свойства.

Кроме того, в целом ряде случаев использование танталата лития предпочтительнее, чем ниобата лития. Так, кристаллы LiTaO_3 обладают естественной анизотропией, почти на порядок меньшей по сравнению с кристаллами LiNbO_3 при одинаковой электрооптической эффективности. Это делает их перспективными для использования в электрооптических затворах и модуляторах лазерного излучения, особенно для световых пучков с заметной расходимостью [14]. К тому же, применение кристаллов LiTaO_3 в качестве пиро-

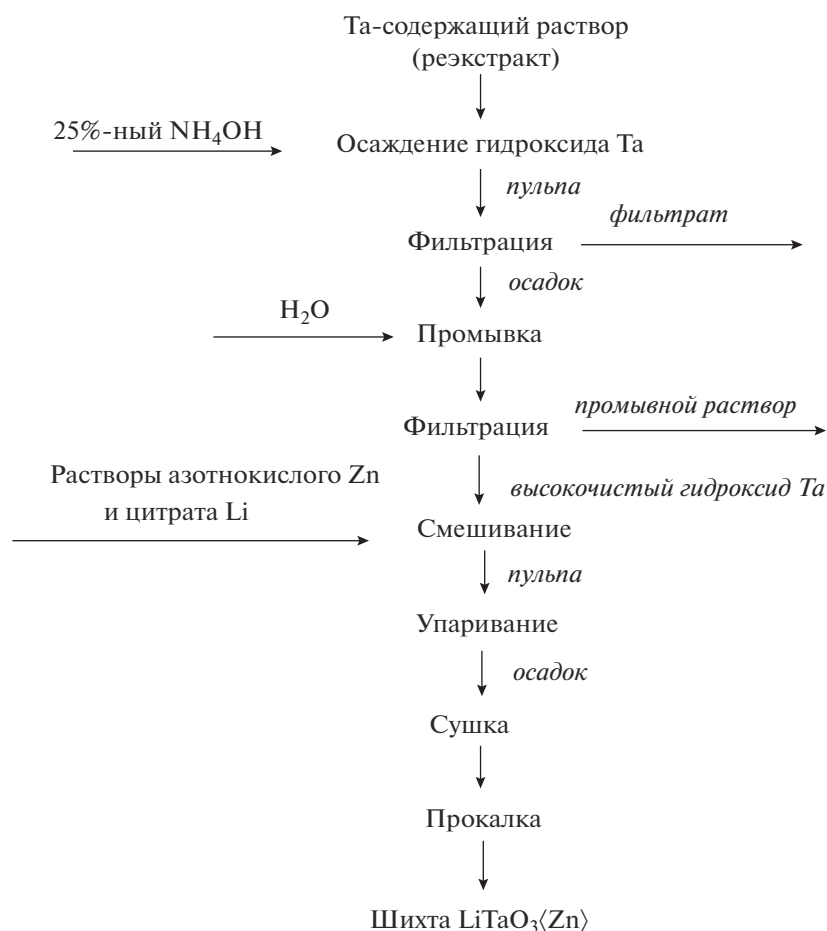


Рис. 1. Технологическая схема получения легированной цинком шихты танталата лития.

электрических сенсоров гораздо предпочтительнее по сравнению с кристаллами LiNbO_3 вследствие существенно больших значений пироэлектрических коэффициентов [2]. Таким образом, задача получения легированных кристаллов $\text{LiTaO}_3\langle M \rangle$ (M – Mg, Zn, Sc и др.) высокой композиционной, оптической и структурной однородности и повышенной оптической прочности является весьма актуальной. Это требует разработки новых подходов к технологии получения легированной шихты $\text{LiTaO}_3\langle M \rangle$, как для выращивания оптических кристаллов, так и для создания функциональной керамики.

В настоящее время разработано несколько методов получения легированной шихты LiNbO_3 [15–20], основным из которых является традиционный метод твердофазного синтеза [20], который не всегда позволяет получать сильно легированные кристаллы высокой оптической однородности. В то же время, синтез шихты LiTaO_3 представлен лишь весьма ограниченным числом работ [20, 21]. В связи с этим разработка методов получения легированной различными примесями шихты

танталата лития имеет важное научное и практическое значение.

Целью настоящей работы являлась разработка нового золь–гель-метода синтеза гомогенно легированной цинком шихты танталата лития и определение условий, обеспечивающих получение однофазного продукта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Легированную шихту танталата лития $\text{LiTaO}_3\langle Zn \rangle$ синтезировали в соответствии с технологической схемой, представленной на рис. 1. В исследованиях были использованы высокочистые реэктракты состава (г/л): Ta_2O_5 – 91.97, F^- – 51.6, которые получены на стадии экстракционной переработки фторидно-серноокислых растворов, образующихся при разложении танталовых отходов [22]. В качестве экстрагента использован октанол-1.

Из высокочистого Та-содержащего раствора (реэктракта) 25%-ным раствором NH_4OH (“ос. ч.”) осаждали гидроксид тантала до pH ~ 8–9. Осадок отфильтровывали на нутч-филт্রে

Таблица 1. Концентрация легирующей примеси Zn в шихте LiTaO₃(Zn)

Заданная концентрация Zn, %	Концентрация Zn по данным рентгенофлуоресцентного анализа, %	Концентрация Zn по данным АЭС-ИСП, %
1	0.96	1.08
2.2	2.19	2.06
3.5	3.61	3.56
5	5.28	5.17

и далее репульпацией трехкратно промывали деионизированной водой от ионов аммония и фтора при соотношении твердой и жидкой фаз Т : Ж = 1 : (3–5). Подсушенный до влажности 60–70% при 90°C высокочистый гидроксид тантала смешивали при Т : Ж = 1 : (1–2) с азотнокислыми растворами Zn и цитратным раствором Li заданных концентраций. Смесь перемешивали в течение 3 ч, после чего полученную пульпу упаривали до вязкого состояния, сушили при 140°C и прокачивали при ~1000–1200°C в течение 3 ч.

Растворы Zn(NO₃)₂ готовили растворением оксида ZnO (“ос. ч.”) в HNO₃ (“ос. ч.”). Концентрацию Zn в шихте LiTaO₃ варьировали в диапазоне 1.0–5 мас. %. Цитрат лития Li₃C₆H₅O₇ получали из Li₂CO₃ (“ос. ч.”) и раствора лимонной кислоты C₆H₈O₇ (“х. ч.”). При этом концентрацию Li в растворе рассчитывали исходя из мольного отношения Li/Ta = 1.0.

Количественное содержание тантала в исходных растворах и шихте танталата лития (после ее перевода в раствор) определяли гравиметрическим методом, фторид-ионов – потенциометрическим на иономере ЭВ-74 с F-селективным электродом ЭВЛ-1М3. Фтор в легированной шихте танталата лития определяли методом пирогидролиза. Концентрацию неконтролируемых катионных примесей (Mg, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Sn, Pb) в шихте LiTaO₃ определяли методом спектрального анализа на приборе ДФС-13. Концентрацию легирующей примеси Zn – методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на приборе “Спектроскан МАКС-GV” и методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) на спектрометре Optima 8300 ИСП-АЭС с предварительным переводом твердых образцов в раствор. Методом АЭС-ИСП определяли также содержание Li в шихте LiTaO₃.

Синхронный термический анализ, включающий одновременное проведение дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ), осуществляли на синхронном анализаторе NETZSCH STA 409 PC/PG в интервале температур 25–250°C при скорости нагрева образцов ~10°C/мин на воздухе.

Рентгенофазовый анализ образцов проводили на дифрактометре ДРОН-2 со скоростью движения счетчика 2 град/мин (CuK_α-излучение, графитовый монохроматор). Для идентификации фаз использовали базу данных JCPDS-ICDD 2002.

ИК-спектры образцов исследовали в области 4000–400 см⁻¹ с использованием таблеток KBr на ИК-Фурье-спектрометре Nicolet 6700.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительные опыты показали, что примесь Zn в виде ZnO нельзя вводить в реактрат, так как при концентрации в растворе 2.5 г/л Zn и выше возрастает степень перехода ионов Zn²⁺ в фильтрат, получаемый после осаждения гидроксида тантала 25%-ным NH₄OH. Потери Zn в этом случае весьма значительны, что объясняется образованием комплексных ионов [Zn(NH₃)₆]²⁺ или [Zn(NH₃)₄]²⁺. В связи с этим примесь цинка вводили в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, смешивая высокочистый гидроксид тантала с азотнокислым раствором Zn(NO₃)₂ с заданной концентрацией Zn.

Установлено, что после стадии смешения раствора Li₃C₆H₅O₇ и Zn(NO₃)₂ с гидроксидом тантала необходимо упаривание образующейся пульпы. В противном случае при ее фильтрации образуется фильтрат с высоким содержанием лития. При этом потери Li могут составлять до ~70%.

На рис. 2 приведены результаты термического анализа осадка, высушенного при 90°C, содержащего Ta и Zn в качестве легирующей примеси. На начальном этапе (до t ~ 150–200°C) происходит удаление воды, а также оксидов азота из гидроксидного остатка и образуются цитратные комплексы металлов. Авторы [23] предполагают, что схема разложения лимонной кислоты, описанная в [24], должна быть свойственна и цитратам металлов. На кривой ДСК, приведенной на рис. 2, видно, что в области температур ~200–500°C наблюдаются два значительных экзотермических эффекта, которые можно объяснить протеканием сложных процессов, связанных с разложением комплексов и горением выделяющихся цитраконового и изомерного ему итаконового ангидридов. В диапазоне температур до ~500°C происхо-

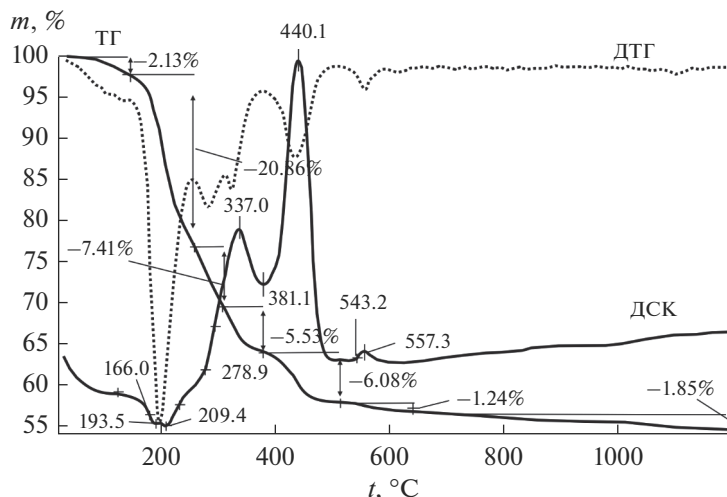


Рис. 2. Кривые термогравиметрии, дифференциальной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии танталосодержащего остатка с примесью цинка (концентрация цинка в LiTaO_3 2.2 мас. %).

дит основная потеря массы, которая составляет ~36%. В результате разложения комплексов возможно образование оксидов металлов и карбоната лития. При температуре выше $\sim 500^\circ\text{C}$ начинается кристаллизация LiTaO_3 , которая на кривой ДСК фиксируется в виде экзотермического эффекта при $\sim 557^\circ\text{C}$ (рис. 2). Образование LiTaO_3 подтверждается данными РФА (рис. 3, дифрактограмма 3). Процесс сопровождается потерей массы, связанной с удалением CO_2 . Потеря массы практически отсутствует при температуре выше $\sim 1100^\circ\text{C}$.

Методом РФА в данном случае не представляется возможным доказать наличие карбоната лития в продуктах термолитиза, полученных при прокаливании цитратного остатка при разных температурах. Однако этот факт может быть установлен путем анализа ИК-спектров спеков.

На рис. 4 в спектрах солей карбоновых кислот отсутствуют интенсивные полосы в области $\sim 1700\text{ см}^{-1}$, относящиеся преимущественно к валентным колебаниям двойных связей $\text{C}=\text{O}$ групп $-\text{COOH}^-$, но имеются полосы в областях $\sim 1300-1400$ и $\sim 1550-1610\text{ см}^{-1}$, относящиеся соответственно к симметричным и антисимметричным валентным колебаниям ионизированных групп $-\text{COO}^-$ [24, 25]. В образце, выдержанном при $\sim 380^\circ\text{C}$ (рис. 4, кривая 1), фиксируются полосы поглощения при частотах ~ 1384 и 1618 см^{-1} , подтверждающие присутствие в нем группы COO^- . При 500°C (рис. 4, кривая 2) эти полосы сохраняются, но появляется полоса поглощения $\sim 1434\text{ см}^{-1}$, относящаяся к группе CO_3^{2-} [26], что в свою очередь свидетельствует об образовании карбоната лития в диапазоне температур $\sim 380-500^\circ\text{C}$. Аналогичные полосы (~ 1444 и 1502 см^{-1}) имеют место в ИК-спектрах и при $\sim 550^\circ\text{C}$ (рис. 4, кривая 3). Од-

нако в этом случае доля карбонат-иона увеличивается, а карбоксила значительно уменьшается. При температурах $\sim 850^\circ\text{C}$ и выше (рис. 4, кривая 4) эти полосы не наблюдаются. Доказательством образования карбоната лития в области температур $\sim 500-550^\circ\text{C}$ является также наблюдаемое в микроскоп МБС-1 образование пузырьков CO_2 при действии на образцы соляной кислоты.

На рис. 3 представлены дифрактограммы образцов цитратного остатка, прокаленных при различных температурах на воздухе, с концентрацией легирующей примеси в танталате лития ~ 2.2 мас. % Zn. Видно, что после прокаливания остатка при ~ 380 и 500°C продукт остается рентгеноаморфным (рис. 3, дифрактограммы 1 и 2). При $\sim 550^\circ\text{C}$ (рис. 3, дифрактограмма 3) на фоне аморфного продукта фиксируется образование фазы LiTaO_3 (карточка 88-0290). По данным РФА, при выдержке образца в течение 1 ч при $\sim 850^\circ\text{C}$, а также $\sim 1000^\circ\text{C}$ наряду с фазой LiTaO_3 обнаруживается фаза ZnO (карточка 79-2205) (рис. 3, дифрактограммы 4–5).

Установлено, что ZnO присутствует в образцах $\text{LiTaO}_3(\text{Zn})$ при содержании ~ 2.2 мас. % Zn и выше в диапазоне температур прокаливания $\sim 800-1000^\circ\text{C}$. С увеличением содержания Zn количество фазы ZnO увеличивается, что прослеживается по возрастанию пиков на дифрактограммах: рефлекс с $d = 2.47\text{ \AA}$ (рис. 5, дифрактограммы 2–4).

В то же время, проковка образца $\text{LiTaO}_3(2.2\text{ мас. \% Zn})$ при $\sim 1200^\circ\text{C}$ позволяет получить однофазный продукт, о чем свидетельствуют данные РФА (рис. 3, кривая б).

Для образца $\text{LiTaO}_3(1.0\text{ мас. \% Zn})$ однофазность достигается уже при $\sim 1000^\circ\text{C}$ (рис. 5, кривая л).

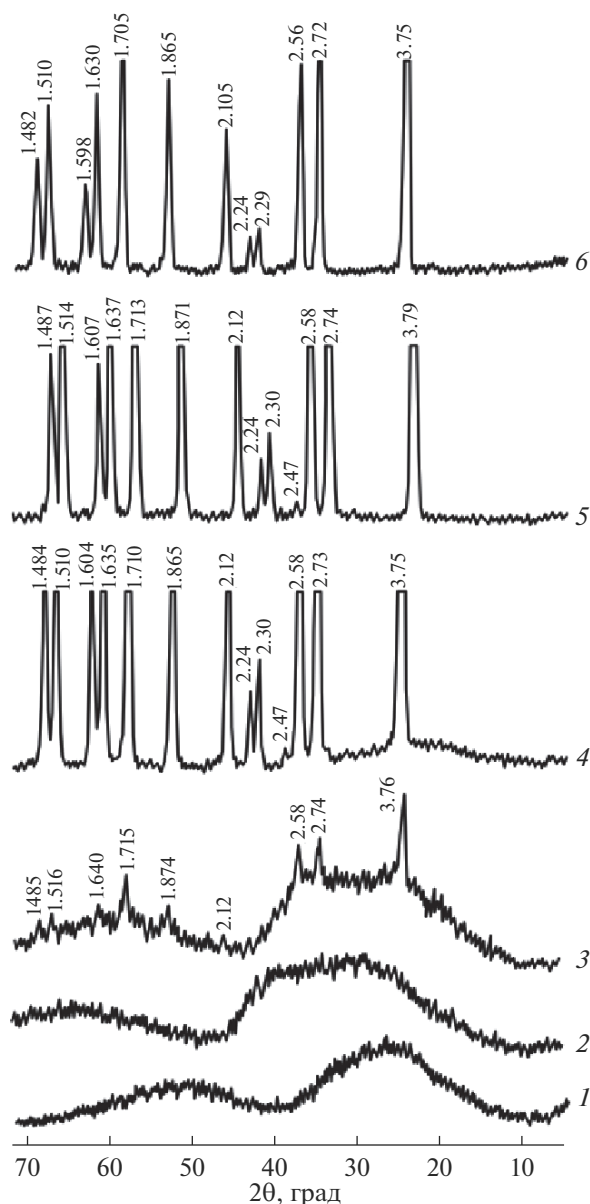


Рис. 3. Дифрактограммы образцов цитратного танталосодержащего остатка, содержащих примесь цинка ($\text{LiTaO}_3\langle 2.2 \text{ мас. \% Zn} \rangle$) и прокаленных при 380 (1), 500 (2), 550 (3), 850 (4), 1000 (5), 1200°C (6).

В образцах $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$ с концентрацией Zn ~ 5.0 мас. %, прокаленных при ~1200°C, на дифрактограмме 5 (рис. 5) наряду с рефлексами, характерными для фазы LiTaO_3 , фиксируются пики с 6.03, 4.92, 3.45 Å, характерные для соединения ZnLiNbO_4 (карточка 89–879), которое, по-видимому, изоструктурно ZnLiTaO_4 . Данные химического анализа показали, что содержание тантала в различных образцах легированной шихты $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$ составляет ~76.5–76.9 мас. %, лития ~2.9–3.0 мас. %. Это соответствует заданному мольному отно-

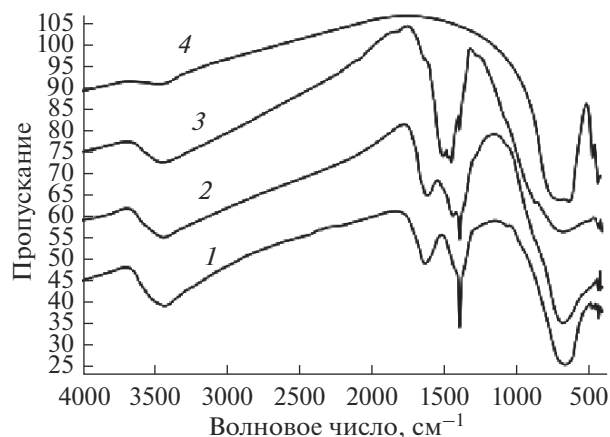


Рис. 4. ИК-спектры цитратного танталосодержащего остатка, прокаленного при 380 (1), 500 (2), 550 (3), 850°C (4).

шению Li/Ta. Содержание фтора в образцах $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$ находится ниже предела чувствительности используемого метода пиролизного анализа (т.е. $[F] < 0.001 \text{ мас. \%}$). По данным спектрального анализа, концентрация катионных примесей в шихте $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$ составляет (мас. %): Mo, Zr, Al, Ti, Co $< 5 \times 10^{-4}$; Mg, Mn, Ni, Cu, V $< 2 \times 10^{-4}$; Fe, Cr, Pb, Sn $< 3 \times 10^{-4}$; Ca $\leq 1 \times 10^{-3}$; Si $\leq 2 \times 10^{-3}$, что свидетельствует о достаточно высокой чистоте синтезированной шихты.

Согласно результатам, представленным в таблице, можно сделать вывод о том, что легирующая примесь цинка при выбранных условиях проведения экспериментов по золь–гель-синтезу шихты $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$, в соответствии с погрешностями используемых методов анализа, практически количественно переходит в LiTaO_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые разработан метод золь–гель-синтеза гомогенно легированной в широком диапазоне концентраций шихты танталата лития ($\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$) заданного состава с использованием цитратных прекурсоров, содержащих литий, тантал и цинк. Установлено, что технологический режим получения однофазной гомогенно легированной шихты $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$, в конечном итоге, зависит от концентрации цинка. Так, для концентрации $[\text{Zn}] \approx 1 \text{ мас. \%}$ необходимо прокалывание гомогенной смеси прекурсоров при ~1000°C, а для концентрации $[\text{Zn}] \approx 2.2 \text{ мас. \%}$ – при ~1200°C.

Полученные результаты служат основой промышленной технологии получения новых оптических кристаллических и функциональных керамических материалов на основе $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$. Причем предполагается, что кристаллы $\text{LiTaO}_3\langle \text{Zn} \rangle$ будут

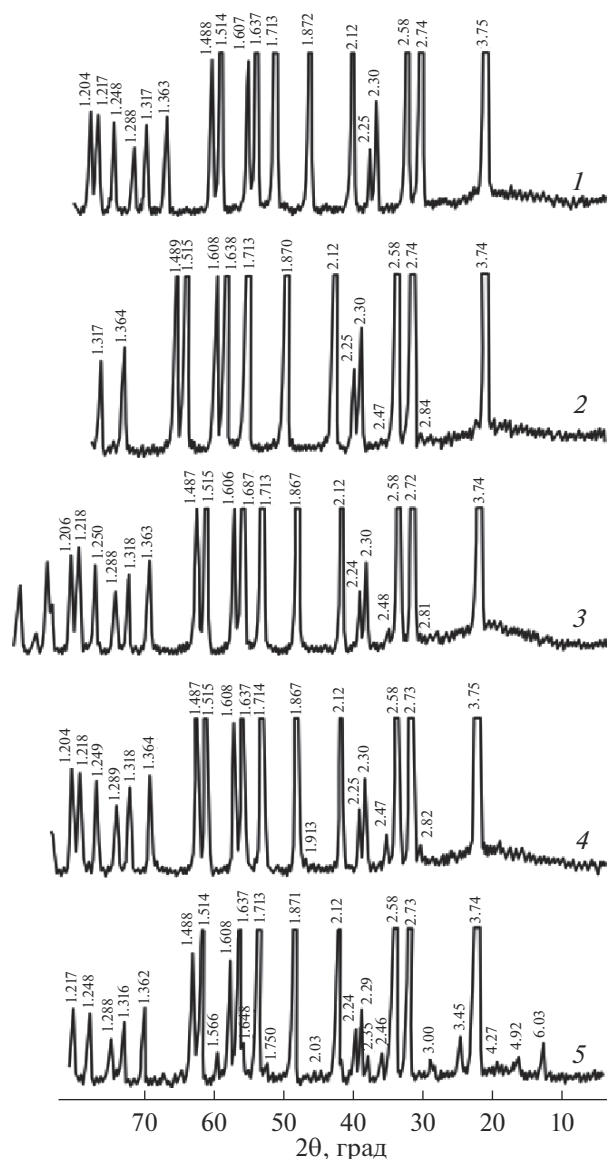


Рис. 5. Дифрактограммы образцов цитратного танталосодержащего остатка, полученных при 1000 (1–4), 1200°C (5), содержащих 1.0 (1), 2.2 (2), 3.5 (3), 5.0 мас. % Zn (4, 5).

обладать повышенной оптической стойкостью, высокой оптической и концентрационной однородностью, а новые функциональные керамические пьезоэлектрические материалы на основе танталата лития — улучшенными акустическими и пьезоэлектрическими характеристиками.

Следующим этапом данной работы будет выращивание сегнетоэлектрических кристаллов $\text{LiTaO}_3(\text{Zn})$ и получение новой функциональной керамики на основе танталата лития, а также исследование их характеристик в зависимости от концентрации цинка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lines M.E., Glass A.M.* Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials. Oxford: Clarendon Press, 1977. 680 p.
2. *Кузьминов Ю.С.* Ниобат и танталат лития — материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975. 224 с.
3. *Кузьминов Ю.С.* Электрооптический и нелинейно-оптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 264 с.
4. *Volk T., Wohleke M.* Lithium Niobate. Defects, Photo-refraction and Ferroelectric Switching. Berlin: Springer, 2008. 250 p.
5. *Yang J., Mao Q., Shang J., Hao H., Li Q., Huang C., Zhang L., Sun J.* Preparation and Characterization of Thick Stoichiometric Lithium Tantalate Crystals by Vapor Transport Equilibration Method // *Mater. Lett.* 2018. V. 232. № 1. P. 150–152. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.105>
6. *Tang F., Long S., Yang X., Yang M., Quan J., Lin S., Ma D., Zhu Y., Wang B.* Optimization of Pyroelectric Figures of Merit via Magnesia Doping in Lithium Tantalate Single Crystal // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. № 39. P. 395101. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad88d>
7. *Vyalikh A., Zschornak M., Kohler T.* Analysis of the Defect Clusters in Congruent Lithium Tantalite // *Phys. Rev. Mater.* 2018. V. 2. № 1. P. 013804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.2.013804>
8. *Pryakhina V.I., Greshnyakov E.D., Lisjikh B.I., Akhmatkhanov A.R., Alikin D.O., Shur V.Ya., Bartasyte A.* As-grown Domain Structure in Lithium Tantalate with Spatially Nonuniform Composition // *Ferroelectrics.* 2018. V. 525. № 1. P. 47–53. <https://doi.org/10.1080/00150193.2018.1432926>
9. *Buzady A., Unferdorben M., Toth G.* Refractive Index and Absorption Coefficient of Undoped and Mg-Doped Lithium Tantalate in the Terahertz Range // *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves.* 2017. V. 38. № 8. P. 963–971. <https://doi.org/10.1007/s10762-017-0393-y>
10. *Lee K.-S., Ko D.-K., Yu N.E.* Temperature-Dependent Sellmeier Equation at Terahertz Frequency Range for 1 mol. % MgO-doped Stoichiometric Lithium Tantalate // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2017. V. 56. № 4. P. 040303. <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.040303>
11. *Gorelik V., Sidorov N., Vodchits A.* Optical Properties of Lithium Niobate and Lithium Tantalate Crystals with Impurities and Defects // *Phys. Wave Phenomena.* 2017. V. 25. № 1. P. 10–19. <https://doi.org/10.3103/S1541308X17010022>
12. *Xiaoling Z., Ming Y., Menqxue L.* Comparison of Broadband Second-Harmonic Generation in Periodically Poled Stoichiometric Lithium Tantalate with Different Magnesium Oxide Doping Concentrations // *J. Opt. Adv. Mater.* 2016. V. 18. № 7–8. P. 613–617.
13. *Ichioka H., Furuya S., Asaka T., Nakano H., Fukuda K.* Crystal Structures and Enhancement of Photoluminescence Intensities by Effective Doping for Lithium Tantalate Phosphors // *Powder Diffraction.* 2015. V. 30. № 4. P. 326–332. <https://doi.org/10.1017/S0885715615000688>

14. *Окатов М.А.* Справочник технолога-оптика. Спб.: Политехника, 2004. 679 с.
15. *Маслобоева С.М., Палатников М.Н., Арутюнян Л.Г., Иваненко Д.В.* Методы получения легированной шихты ниобата лития для выращивания монокристаллов // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2017. № 38(64). С. 34–43.
16. *Маслобоева С.М., Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Арутюнян Л.Г., Чуфырев П.Г.* Синтез и исследование строения оксида ниобия(V), легированного катионами Mg^{2+} и gd^{3+} // Журн. неорган. химии. 2011. Т. 56. № 8. С. 1264–1268.
17. *Палатников М.Н., Бирюкова И.В., Маслобоева С.М., Макарова О.В., Кравченко О.Э., Яничев А.А., Сидоров Н.В.* Сравнение структуры и оптической однородности кристаллов $LiNbO_3\langle Mg \rangle$, выращенных из шихты различного генезиса // Неорган. материалы. 2013. Т. 49. № 7. С. 765–770. <https://doi.org/10.7868/S0002337X13060080>
18. *Маслобоева С.М., Елизарова И.Р., Кадырова Г.И., Арутюнян Л.Г.* Синтез и свойства гомогенно легированных $Nb_2O_5\langle Dy \rangle$ и шихты состава $LiNbO_3\langle Dy \rangle$ // Неорган. материалы. 2014. Т. 50. № 8. С. 867–873. <https://doi.org/10.7868/S0002337X14080132>
19. *Маслобоева С.М., Арутюнян Л.Г., Палатников М.Н.* Новый подход к получению легированной шихты ниобата лития для выращивания монокристаллов // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 4. С. 421–426. <https://doi.org/10.7868/S0044457X18040050>
20. *Палатников М.Н., Сидоров Н.В., Калинин В.Т.* Сегнетоэлектрические твердые растворы на основе оксидных соединений ниобия и тантала: синтез, исследование структурного упорядочения и физических характеристик. Санкт-Петербург: Наука, 2001. 2002 (переиздание). 302 с.
21. *Маслобоева С.М., Елизарова И.Р., Арутюнян Л.Г., Калинин В.Т.* Синтез и исследование шихты танталата лития, легированной редкоземельными элементами // Докл. Академии наук. 2015. Т. 460. № 4. С. 427–431. <https://doi.org/10.7868/S0869565215040143>
22. *Маслобоева С.М., Дубошин Г.Н., Арутюнян Л.Г.* Исследования получения гептафтортанталата калия из фторидно-серноокислых растворов // Вестн. МГТУ. 2009. Т. 12. № 2. С. 279–285.
23. *Фарбун И.А., Романова И.В., Териковская Т.Е., Дзанашивили Д.И., Кириллов С.А.* Комплексо-образование при синтезе оксида цинка из цитратных растворов // Журн. прикл. химии. 2007. Т. 80. № 11. С. 1773–1778.
24. *Werde K.V., Mondelaers D., Vanhoyland G., Nelis D., Van Bael M.K., Mullens J.* Thermal Decomposition of the Ammonium Zinc Acetate Citrate Precursor for Aqueous Chemical Solution Depositions of ZnO // J. Mater. Sci. 2002. V. 37. № 1. P. 81–88.
25. *Харитонов Ю.Я., Алиханова З.М.* Инфракрасные спектры поглощения некоторых комплексных соединений уранила с остатками окси-кислот // Радиохимия. 1964. Т. 6. № 6. С. 702–713.
26. *Nyquist R.A.* Infrared Spectra of Inorganic Compounds. N.Y., London: Academic Press, 1971. 496 p.