

УДК 546.05535.37

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НИОБАТОВ-ТАНТАЛАТОВ ГАДОЛИНИЯ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ЕВРОПИЯ

© 2021 г. Г. А. Гусев¹, С. М. Маслобоева^{2, *}, В. А. Кравец¹, М. А. Яговкина¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021 Россия

²Институт 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 20.09.2020 г.

После доработки 27.11.2020 г.

Принята к публикации 30.11.2020 г.

Разработана технологическая схема получения активированных ионами европия ниобатов, танталатов гадолиния и твердых растворов на их основе с использованием золь–гель-метода. Показано, что в процессе синтеза кристаллических порошков при повышении температуры прокаливания от 1200 до 1400°C происходит уменьшение содержания фазовых примесей с 10–15 до 4–10 мас. %. Установлено, что при этих температурах образцы $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$ имеют различные структурные поли-типы. Синтезированные материалы обладают яркой красной люминесценцией при фотовозбуждении.

Ключевые слова: ниобаты и танталаты гадолиния, твердые растворы, активация ионами европия, синтез, фотолюминесценция

DOI: 10.31857/S0002337X21040060

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых материалов, эффективно преобразующих высокоэнергетическое излучение (рентгеновское, гамма-излучение, потоки α -частиц, электронов) в видимый свет, остается важной практической задачей. Такие материалы (сцинтилляторы) имеют широкое применение в дозиметрии, медицине, науке в качестве детекторов высокоэнергетического излучения [1–4].

Создание сцинтилляторов на основе оксидов тяжелых металлов, обладающих высокой плотностью, большим эффективным атомным номером и, соответственно, большим сечением захвата высокоэнергетического излучения, является весьма актуальным. Такие материалы отличаются высокой физической и химической стойкостью, что обуславливает их использование в агрессивных условиях [5–7]. К недостаткам подобных сцинтилляторов можно отнести невысокий световыход по сравнению с промышленно производимыми материалами (NaI(Tl), CsI(Tl) и др.). Для решения этой проблемы можно использовать явление переноса возбуждения от собственных дефектов к центрам люминесценции – сенсбилизацию [8]. В связи с этим, сцинтилляторы, обладающие интенсивной собственной люминесценцией, представляют особый интерес.

Одними из таких материалов являются ниобаты и танталаты редкоземельных элементов. Интенсивная собственная люминесценция в них связана с вакансиями кислорода в комплексах NbO_6 и TaO_6 [9, 10]. Редкоземельные ниобаты отличаются яркой собственной люминесценцией [11], танталаты обладают высокой плотностью и поглощающей способностью [12]. В работах [13, 14] было предложено совместить и улучшить свойства этих двух материалов путем создания твердого раствора на их основе. Такое решение основано на аналогии с другими исследованными системами [15, 16]. Активация ниобатов и танталатов ионами редкоземельных элементов исследовалась в ряде работ [17–19]. Использование европия позволяет получить материал с яркой люминесценцией в красном диапазоне спектра.

В настоящее время наиболее широко применяется твердофазный метод синтеза ниобатов-танталатов редкоземельных элементов [14]. К его недостаткам можно отнести потери на этапе механического измельчения компонентов и относительно длительный отжиг при температурах от 1400°C. В работе [20] для синтеза ниобатов-танталатов предлагается использовать жидкофазный метод, который позволяет проводить относительно быструю прокалику при температуре до 1400°C

Таблица 1. Концентрация гадолия и европия в фильтратах и промывных растворах (масса образца 20 г)

Образец	Заданный состав образца	Объем, л	C_{Gd} , мкг/л	C_{Eu} , мкг/л	фильтрат			промывной раствор		
					Объем, л	C_{Gd} , мкг/л	C_{Eu} , мкг/л	Объем, л	C_{Gd} , мкг/л	C_{Eu} , мкг/л
1	$(Gd_{0.98}Eu_{0.02})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$	0.072	5.78	0.025	0.49	1.61	0.016			
2	$(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$	0.057	29.9	1.36	0.45	77.3	3.88			
3	$(Gd_{0.9}Eu_{0.1})Nb_{0.9}Ta_{0.1}O_4$	0.126	25.1	0.52	0.45	52.9	5.58			
4	$(Gd_{0.98}Eu_{0.02})Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$	0.057	16.3	0.48	0.47	30.7	0.31			
5	$(Gd_{0.94}Eu_{0.06})Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$	0.087	7.41	0.40	0.47	18.1	1.05			
6	$(Gd_{0.9}Eu_{0.1})Nb_{0.3}Ta_{0.7}O_4$	0.088	3.57	0.30	0.47	21.5	1.95			
7	$Gd_{0.98}Eu_{0.02}NbO_4$	0.053	26.4	0.57	0.53	54.7	1.23			
8	$Gd_{0.94}Eu_{0.06}NbO_4$	0.094	14.4	0.68	0.33	10.3	5.43			
9	$Gd_{0.9}Eu_{0.1}NbO_4$	0.026	35.2	2.06	0.27	53	4.96			
10	$Gd_{0.98}Eu_{0.02}TaO_4$	0.055	0.6	0.03	0.26	6.2	0.12			
11	$Gd_{0.94}Eu_{0.06}TaO_4$	0.053	0.9	0.07	0.33	105	3.23			

и гомогенизировать компоненты на молекулярном уровне, т.е. более точно следовать заданному составу. Порошки, полученные таким способом, можно использовать в качестве люминофоров.

Цель настоящей работы – разработка технологической схемы синтеза ниобатов, танталатов гадолия и твердых растворов на их основе, активированных европием, с использованием золь–гель-метода, а также исследование фотолюминесцентных свойств полученных порошковых материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе исследован синтез порошков ряда изоморфных твердых растворов составов: $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$ ($x = 0.9, 0.94$ и $0.98, y = 0.3$ и 0.9), $Gd_xEu_{1-x}NbO_4$ ($x = 0.9, 0.94$ и 0.98) и $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$ ($x = 0.94$ и 0.98). В соответствии с технологической схемой [20] из высокочистых фторидных растворов ниобия и тантала аммиачным осаждением получали их смешанные гидроксиды. При этом Nb-содержащий и Ta-содержащий растворы готовили путем растворения оксидов Nb_2O_5 “ос. ч.” и Ta_2O_5 “ос. ч.” в HF “ос. ч.”. Использовали азотнокислые растворы гадолия и европия, полученные растворением Gd_2O_3 “ос. ч.” и Eu_2O_3 “ос. ч.” в HNO_3 “ос. ч.”. Объемы растворов рассчитывали исходя из содержания Nb, Ta, Gd и Eu в исследуемом образце.

На рис. 1 приведена схема получения порошков $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$ из высокочистых смешанных гидроксидов ниобия и тантала. Для синтеза $Gd_xEu_{1-x}NbO_4$ и $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$ использовали гидроксид Nb или Ta соответственно. Растворы $Gd(NO_3)_3$ и $Eu(NO_3)_3$ перемешивали с гидроксидом в течение 3 ч при соотношении твердой и жидкой фаз $T : Ж = 1 : (1-2)$. В полученную пульпу

вводили 25%-ный раствор NH_4OH до pH ~9–10. После фильтрации и трехкратной промывки осадка от ионов аммония деионизированной водой при $T : Ж = 1 : (4-5)$ проводили его сушку при ~140°C, затем прокалку в печи сопротивления при 700°C в течение 2 ч и размол в шаровой халцедоновой мельнице МК 1. Затем порошок прокаливали в течение 3 ч при 1200°C. Прокаленные при 1200°C порошки после размолки подвергали термообработке при 1400°C. Номера образцов представлены в табл. 1.

Во фторидных Nb- и Ta-содержащих растворах содержание ниобия и тантала определяли гравиметрическим методом, фторид-ионов – потенциометрическим на иономере ЭВ-74 с F-селективным электродом ЭВЛ-1МЗ. Фтор в синтезированных порошках анализировали методом пиролиза. Гадолий и европий в фильтратах и промывных растворах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) на масс-спектрометре Elan-9000 DRC-e.

Для оценки состава порошков использовали рентгеноспектральный микроанализ (РСМА), который выполняли на электронно-зондовом микроанализаторе Camebax (Cameca, France), снабженном четырьмя рентгеновскими волновыми спектрометрами. Для исследования порошки запрессовывали в индий. На все образцы дополнительно напыляли углеродную пленку на универсальном вакуумном посту JEE-4C (JEOL, Japan) для обеспечения стока заряда. РСМА проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ и поглощенном токе электронов 10 нА. Эталонными образцами для определения содержания гадолия и европия были выбраны соответственно стехиометричные ортофосфаты гадолия $GdPO_4$ и европия $EuPO_4$. Для тантала и ниобия

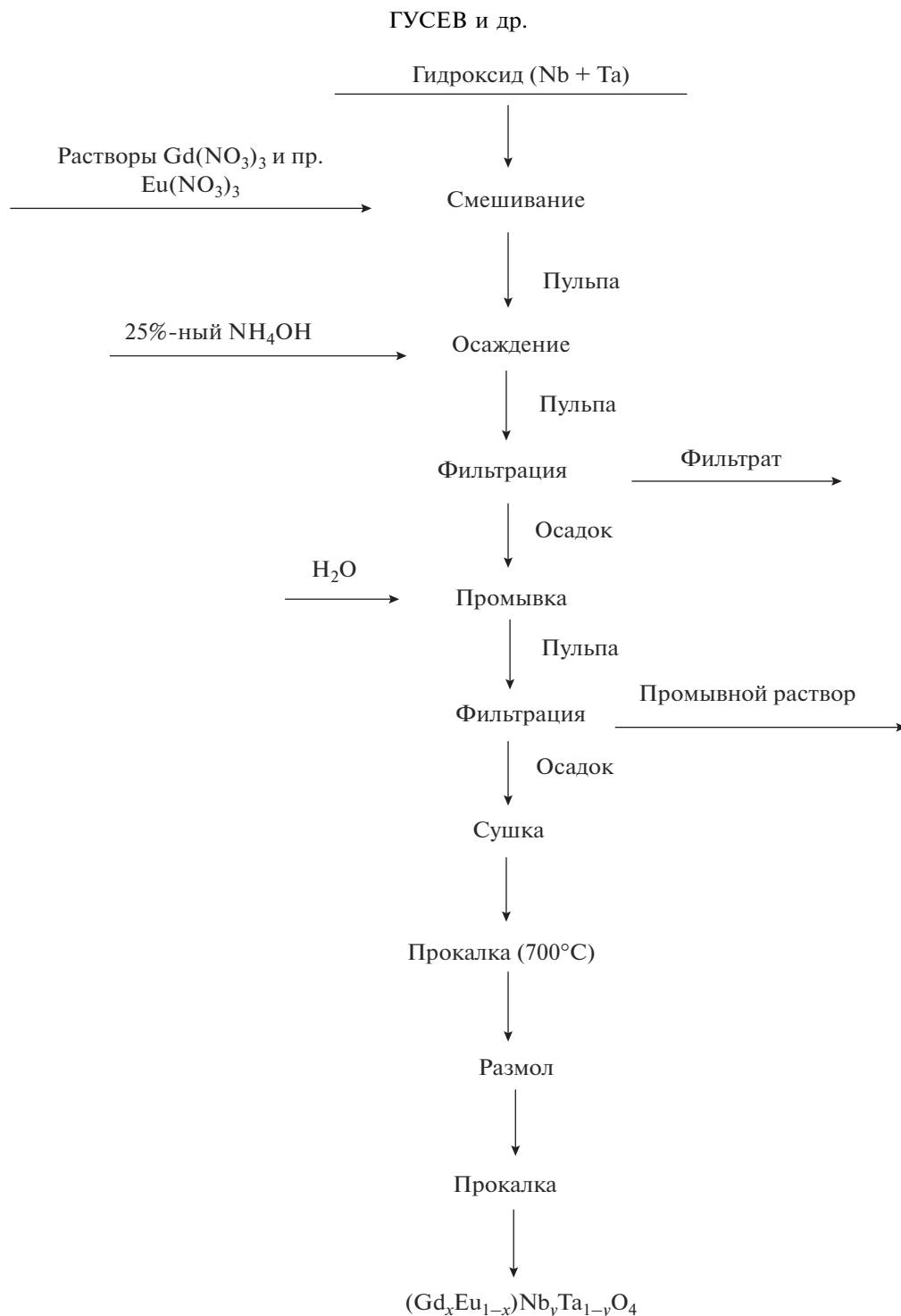


Рис. 1. Технологическая схема получения порошков Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O₄.

эталоном служили металлический ниобий и тантал с чистотой 99.9%. В качестве аналитических линий использовали: L_{α} для Gd, L_{α} для Eu, M_{α} для Ta и L_{α} для Nb. Латеральный размер анализируемой области составлял ~5 мкм. Содержание кислорода рассчитывали по стехиометрии.

Синхронный термический анализ (СТА), включающий одновременное проведение дифференци-

альной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ), осуществляли на синхронном анализаторе NETZSCH STA 409 PC/PG в интервале температур 30–1400°C при скорости нагрева образцов 15°C/мин на воздухе.

Рентгендифракционный фазовый анализ (РДФА) на этапе выполнения СТА проводили на дифрактометре ДРОН-2 со скоростью движения

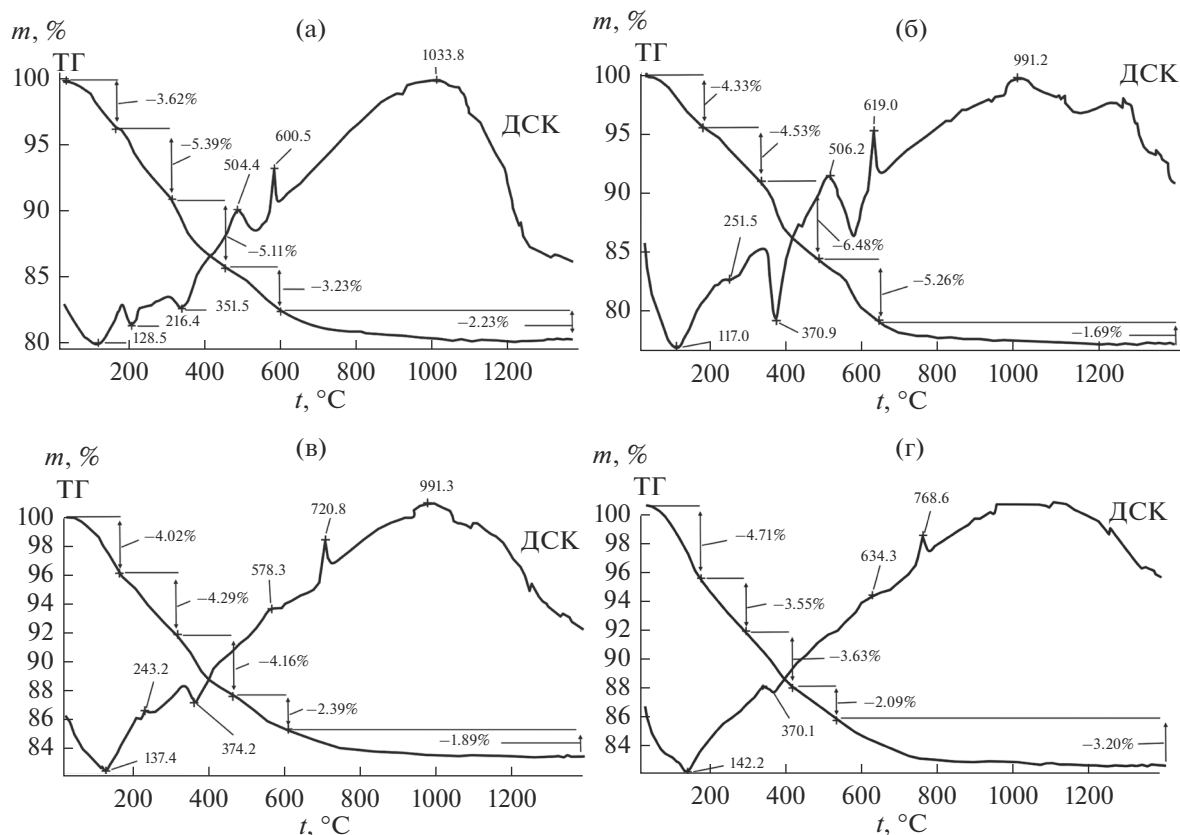


Рис. 2. Кривые ТГ и ДСК гидратных осадков: образцы 9 (а), 3 (б), 4 (в), 10 (г).

счетчика 2 град/мин (CuK_α -излучение, графитовый монохроматор). Для идентификации фаз использовали базу данных JCPDS-ICDD 2002.

Фазовый состав и структуру готовых образцов исследовали методом РДФА на дифрактометре D2 Phaser (Bruker, Germany) ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, 30 кВ, 10 мА), оснащенный PSD-детектором. Расшифровка фазового состава проводилась с помощью программного пакета Eva (Bruker), опираясь на базу данных ICDD (PDF 2, relies 2014). Параметры элементарной ячейки твердых растворов определяли с помощью программного пакета для профильного анализа Total Pattern Analysis Solutions (TOPAS).

Фотолюминесценцию (ФЛ) исследовали на установке ДФС 36 (ЛОМО) с полупроводниковым лазером. Установка позволяла регистрировать спектры люминесценции в видимом диапазоне (400–900 нм). Порошки для исследования запрессовывали в индий таким образом, чтобы получилась плоская поверхность диаметром ~ 5 мм. Спектры ФЛ были получены при возбуждении полупроводниковым лазером с длиной волны $\lambda_{\text{возб}} = 405$ нм, диаметром лазерного луча на образце $d = 0.6$ мм и током на лазерном диоде $I = 1.75$ А. Угол между лазерным лучом и поверхностью образцов составлял 40° .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные МС-ИСП (табл. 1) свидетельствуют о том, что с учетом объемов растворов потери гадолиния и европия в фильтрах и промывных растворах для большинства исследуемых образцов составляют величину, значительно меньшую 0.1 мг, при синтезе 20–40 г порошка. Отсюда можно сделать вывод, что гадолиний и европий практически полностью переходят из растворов $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$ в гидроксидный осадок.

Концентрация фтора в порошках находится ниже предела чувствительности используемого метода анализа (менее $1 \times 10^{-3}\%$).

На рис. 2 представлены результаты термического анализа осадков различного состава, высушенных при 70°C . Установлено, что до $t \sim 250^\circ\text{C}$ происходит поэтапное удаление воды и оксидов азота. Потеря массы при этом составляет $\sim 6\text{--}7\%$. При дальнейшем повышении температуры (до 400°C) наблюдается эндотермический эффект, по-видимому, связанный с формированием промежуточных оксоловых фаз гадолиния и ниобия (тантала), которые с ростом температуры разлагаются с образованием оксидов Gd_2O_3 и Nb_2O_5 (Ta_2O_5), о чем свидетельствуют экзотермические эффекты соответственно при 504.4 и 600.5°C (рис. 2а), при

Таблица 2. Средние элементные составы образцов $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$ (прокаливание при 1400°C)

Образец	y		1 - x	
	заданный состав	результаты РСМА	заданный состав	результаты РСМА
1	0.9	0.90 ± 0.13	0.02	0.02 ± 0.003
2	0.9	0.90 ± 0.13	0.06	0.05 ± 0.007
3	0.9	0.91 ± 0.13	0.1	0.09 ± 0.013
4	0.3	0.29 ± 0.04	0.02	0.02 ± 0.003
5	0.3	0.31 ± 0.04	0.06	0.05 ± 0.007
6	0.3	0.30 ± 0.04	0.1	0.09 ± 0.013
7	1	1	0.02	0.02 ± 0.003
8	1	1	0.06	0.06 ± 0.009
9	1	1	0.1	0.09 ± 0.013
10	0	0	0.02	0.02 ± 0.003
11	0	0	0.06	0.06 ± 0.009

506.5 и 617.7°C (рис. 2б), при 578.3 и 720.8°C (рис. 2в), при 634.3 и 768.6°C (рис. 2г). При температуре выше ~650°C начинается кристаллизация фазы $GdNbO_4$ (образцы 1–3, 7–9), а при $t > 700^\circ C$ начинается образование фазы $GdTaO_4$ (образцы 4–6, 10, 11). В диапазоне температур до ~800°C наблюдается основная потеря массы, которая составляет ~16–20%. Потеря массы практически отсутствует при температуре выше ~1200°C. Результаты СТА всех исследованных образцов качественно подобны.

Этапы процесса получения $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$, $Gd_xEu_{1-x}NbO_4$, $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$, выявленные с помощью СТА, подтверждаются результатами РФА Gd, Eu, Nb, Ta -содержащих осадков, прокаленных при различных температурах на воздухе. Установлено, что после прокалки остатка при ~400 и 500°C продукты остаются рентгеноаморфными, но в области ~500–600°C на фоне аморфности наблюдается образование фазы Gd_2O_3 . При ~600–650°C в образцах присутствует Gd_2O_3 и фиксируется образование Nb_2O_5 (Ta_2O_5). Эти же фазы обнаруживаются и при более высокой температуре, но при этом зафиксированы также фазы $GdNbO_4$ или $GdTaO_4$.

В отличие от технологической схемы, рассматриваемой в работе [20], была предусмотрена прокатка осадков при 700°C с последующим их размолотом и дальнейшей термической обработкой. Это позволило получить более однородные по фазовому составу порошки $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$, $Gd_xEu_{1-x}NbO_4$, $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$.

По данным РСМА, среднее значение элементного состава соответствует заданному. Отклонения от заданного состава для всех исследованных образцов находятся в пределах ошибки используемого

метода. В табл. 2 приведены результаты РСМА порошков, прокаленных при температуре 1400°C.

На рис. 3 показаны дифрактограммы образцов $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$, $Gd_xEu_{1-x}NbO_4$ и $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$. Самые интенсивные дифракционные максимумы принадлежат основной фазе. Расшифровка дифрактограмм показала, что образцы с преобладанием в составе ниобия (1–3, 7–9) в среднем имеют одну основную фазу, соответствующую моноклинной структуре $GdNbO_4$ (PDF 01-075-5932, $I2/a$) (рис. 3а); с преобладанием тантала (4–6, 10, 11) – соответствующую моноклинной структуре $GdTaO_4$ (PDF 00-024-0441, $I2$) (рис. 3в, 3г). Исключение составляют образцы 10 и 11, прокаленные при 1200°C (рис. 3б). Они имеют основную фазу, соответствующую другому политипу моноклинного $GdTaO_4$ (PDF 01-072-2017, $P2/a$). После прокалки при 1400°C в образцах 10 и 11, как и в образцах 4–6, преобладает моноклинная структура $GdTaO_4$ (PDF 00-024-0441, $I2$).

Полученные при температуре 1400°C образцы имеют не более 4–10 мас. % примесных фаз (основные примеси – Nb_2O_5 , Gd_3NbO_7 , Gd_2O_3). Причем твердые растворы с присутствием в составе ниобия показывают наименьшее количество примесей (менее 4 мас. % для образцов 1–6). Танталаты гадолия (образцы 10, 11) отличаются наибольшим содержанием дополнительных фаз. Образцы, полученные при температуре 1200°C, имеют максимальное количество примесей (Nb_2O_5 , Gd_3NbO_7 , Gd_2O_3 , GdO) вплоть до 15 мас. % для $Gd_xEu_{1-x}TaO_4$. В результате исследования не обнаружено фаз, соответствующих оксидам европия ни в одном из образцов, исключая образцы 10 и 11, где содержание таких примесей, как $Eu_{1-x}O$ или $EuTa_7O_{19}$, может достигать 6–10 мас. %. Также, в образце 5 (1200°C) обнаружено несколько мас. %

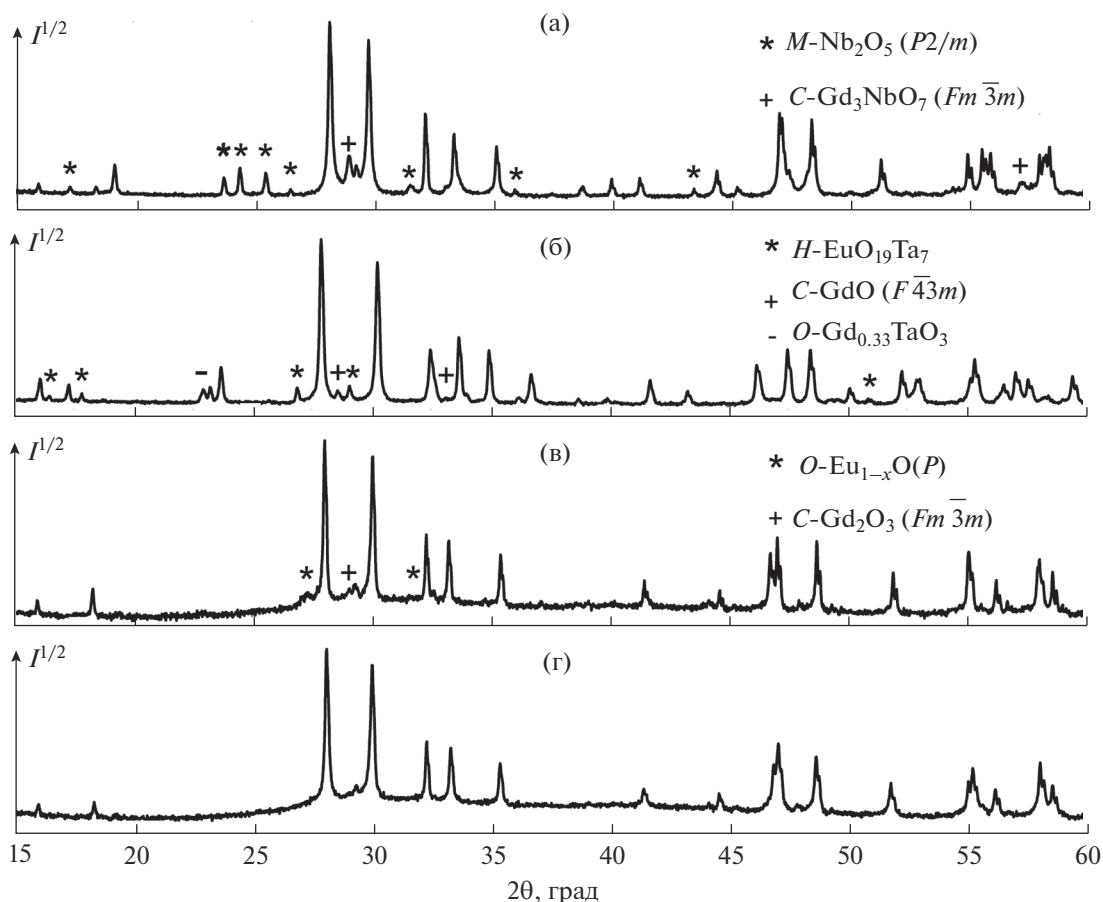


Рис. 3. Дифрактограммы образцов: 7 (1200°C) (а), 10 (1200°C) (б), 10 (1400°C) (в), 4 (1200°C) (г).

EuTa₃O₉. Тем не менее, можно говорить об успешном замещении европием гадолиния в твердых растворах. Это также подтверждается возрастанием параметров элементарной ячейки основной фазы образцов при монотонном увеличении содержания европия практически для всех серий твердых растворов (табл. 3).

Все образцы обладают яркой красной люминесценцией в области 612 нм при фотовозбуждении. На рис. 4 представлены спектры ФЛ в диапазоне 580–640 нм для образцов с различным соотношением Nb/Ta. В данном диапазоне наблюдаются группы полос, соответствующие магнитодиполь-

ному переходу ⁵D₀–⁷F₁ (около 590 нм) и электродипольному переходу ⁵D₀–⁷F₂ (около 610 нм) [21] Eu³⁺. Форма спектра фото- и катодолюминесценции напрямую зависит от локального окружения Eu [22–24] вследствие различий правил отбора для разных переходов [25]. Спектры образцов с относительным содержанием ниобия 90 и 100% в паре Nb/Ta имеют фактически одинаковую форму (рис. 4а, 4б). Основной вклад в люминесценцию Eu дает фаза M-GdNbO₄. Также форма спектров фактически одинакова у образцов с содержанием ниобия 30 и 0% (рис. 4в, 4г).

Таблица 3. Параметры элементарной ячейки образцов Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O₄ (прокаливание при 1200°C)

Образец	1 – x	Параметры, Å		
		a	b	c
1	0.02	5.3772(1)	11.0958(3)	5.1048(1)
2	0.06	5.3775(1)	11.0962(2)	5.1054(1)
3	0.1	5.3789(1)	11.0974(2)	5.1055(1)
4	0.02	5.3983(1)	11.0770(3)	5.0907(1)
5	0.06	5.3986(1)	11.0784(2)	5.0906(1)
6	0.1	5.4001(1)	11.0799(2)	5.0910(1)

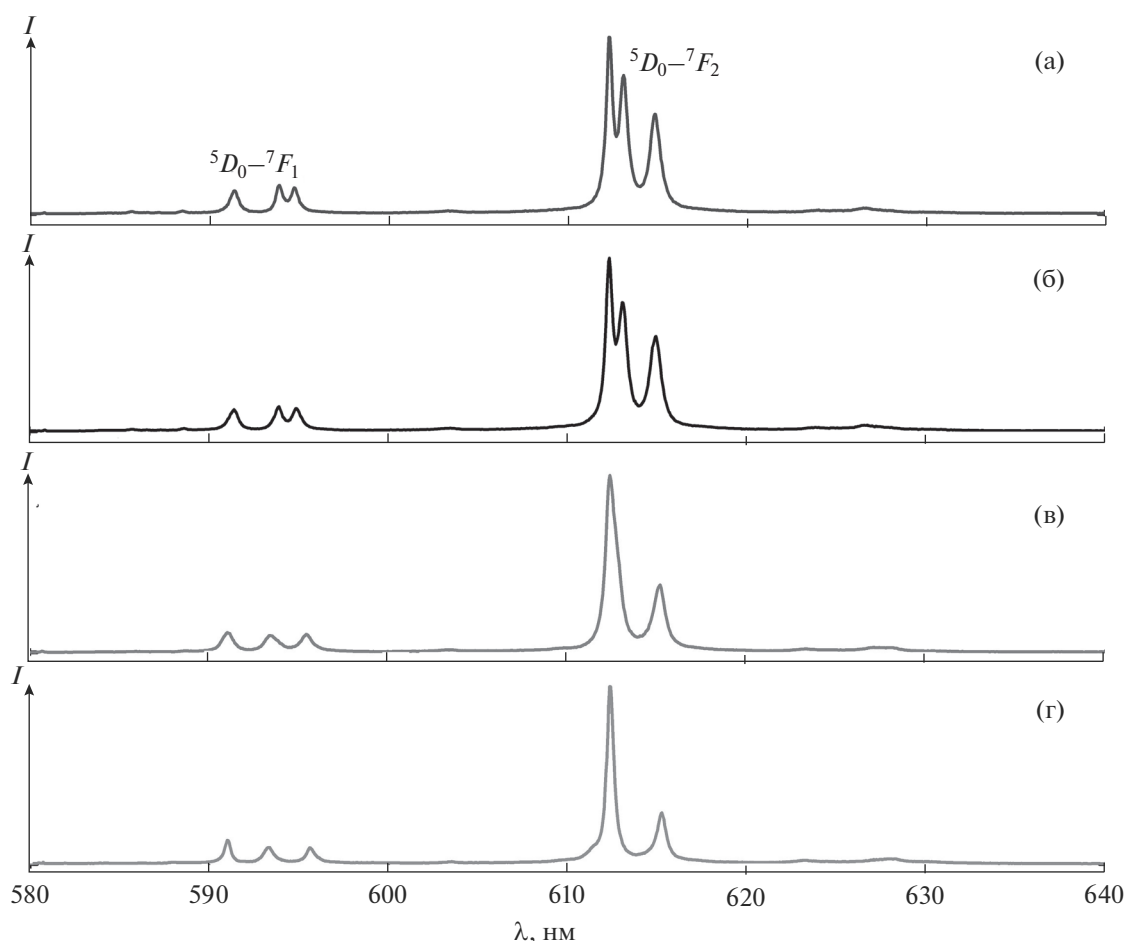


Рис. 4. Спектры ФЛ образцов $Gd_xEu_{1-x}Nb_yTa_{1-y}O_4$, полученных при 1400°C : 8 (100% Nb) (а), 2 (90% Nb) (б), 5 (30% Nb) (в), 11 (0% Nb) (г).

Были получены предварительные спектры катодoluminesценции с высокой интенсивностью излучения, форма которых совпала со спектрами ФЛ. Из этого можно сделать вывод о перспективности исследования полученных материалов для применений в качестве сцинтилляторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований предложена технологическая схема синтеза ниобатов, танталатов гадолиния и твердых растворов на их основе, активированных европием, с использованием золь–гель-метода. Исследование полученных материалов показало соответствие их среднего элементного состава заданному. Все образцы имеют основную фазу, соответствующую моноклинной структуре $GdNbO_4$ либо $GdTaO_4$. Содержание примесных фаз не превышает 15 мас. % и уменьшается до 4–10 мас. % при повышении температуры прокаливания с 1200 до 1400°C .

Все полученные порошки имеют яркую люминесценцию в красном диапазоне спектра. Форма спектра зависит от фазового состава образца.

Синтезированные материалы перспективны для использования в качестве люминофоров при создании детекторов в медицине и других областях.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-50149 мол_нр.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях” при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Авторы благодарят Т.Б. Попову за помощь в проведении РСМА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tavernier S., Gektin A., Grinyov B., Moses W.W. Radiation Detectors for Medical Applications. N.Y.: Springer Science, 2006. 320 p.
2. Glodo J., Wang Y., Shawgo R., Brecher Ch., Hawrami R.H., Tower J., Shah K.S. New Developments in Scintillators for Security Applications // Phys. Procedia. 2017. V. 90.

- P. 285–290.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.012>
3. Yanagida T. Inorganic Scintillating Materials and Scintillation Detectors // Proc. Jpn. Acad., Ser. B. 2018. V. 94. № 2. P. 75–97.
<https://doi.org/10.2183/pjab.94.007>
 4. Lecoq P., Gektin A., Korzhik M. Inorganic Scintillators for Detector Systems. Cham: Springer, 2017. 420 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-45522-8>
 5. Stanek C.R., McClellan K.J., Levy M.R., Grimes R.W. Defect Behavior in Rare Earth REAlO₃ Scintillators // J. Appl. Phys. 2006. V. 99. № 11. P. 113518.
<https://doi.org/10.1063/1.2200759>
 6. Nikl M., Yoshikawa A. Recent R&D Trends in Inorganic single-crystal Scintillator Materials for Radiation Detection // Adv. Opt. Mater. 2015. V. 3. № 4. P. 463–481.
<https://doi.org/10.1002/adom.201400571>
 7. Dujardin C., Auffray E., Bourret-Courchesne E., Dorenbos P., Lecoq P., Nikl M., Vasil'ev A.N., Yoshikawa A., Zhu R.Y. Needs, Trends, and Advances in Inorganic Scintillators // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2018. V. 65. № 8. P. 1977–1997.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2840160>
 8. Nazarov M.V., Jeon D.Y., Kang J.H., Popovici E.J., Muresan L.E., Zamoryanskaya M.V., Tsukerblat B.S. Luminescence Properties of Europium–Terbium Double Activated Calcium Tungstate Phosphor // Solid State Commun. 2004. V. 131. № 5. P. 307–311.
<https://doi.org/10.1016/j.ssc.2004.05.025>
 9. Schipper W.J., Hoogendorp M.F., Blasse G. The Luminescence and X-ray Storage Properties of Pr³⁺ and Ce³⁺ in YNbO₄ and M'-YTaO₄ // J. Alloys Compd. 1993. V. 202. № 1–2. P. 283–287.
[https://doi.org/10.1016/0925-8388\(93\)90550-7](https://doi.org/10.1016/0925-8388(93)90550-7)
 10. Voloshyna O., Neicheva S.V., Starzhinskiy N.G., Zhenya I.M., Gridin S.S., Baumer V.N., Sidletskiy O.T. Luminescent and Scintillation Properties of Orthotantalates with Common Formulae RETaO₄ (RE = Y, Sc, La, Lu and Gd) // Mater. Sci. Eng. B. 2013. V. 178. № 20. P. 1491–1496.
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2013.08.003>
 11. Lee S.K., Chang H., Han C.H., Kim H.J., Jang H.G., Park H.D. Electronic Structures and Luminescence Properties of YNbO₄ and YNbO₄:Bi // J. Solid State Chem. 2001. V. 156. № 2. P. 267–273.
<https://doi.org/10.1006/jssc.2000.8941>
 12. Su M.Z., Zhao W. Spectroscopic Properties of Rare Earths in Optical Materials. Berlin: Springer, 2005. P. 500–529.
https://doi.org/10.1007/3-540-28209-2_10
 13. Voloshyna O.V., Boiaryntseva I.A., Baumer V.N., Ivanov A.I., Korjik M.V., Sidletskiy O.T. New, Dense, and Fast Scintillators Based on Rare-Earth Tantalate-Niobates // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2014. V. 764. P. 227–231.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.07.044>
 14. Voloshyna O., Sidletskiy O., Spassky D., Gerasymov I., Romet I., Belsky A. Nonlinear Behavior of Structural and Luminescent Properties in Gd(Nb_xTa_{1-x})O₄ mixed // Opt. Mater. 2018. V. 76. P. 382–387.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.01.003>
 15. Kamada K., Endo T., Tsutumi K., Yanagida T., Fujimoto Y., Fukabori A., Yoshikawa A., Pejchal J., Nikl M. Composition Engineering in Cerium-Doped (Lu,Gd)₃(Ga,Al)₅O₁₂ Single-Crystal Scintillators // Cryst. Growth Des. 2011. V. 11. № 10. P. 4484–4490.
<https://doi.org/10.1021/cg200694a>
 16. Sidletskiy O. Trends in Search for Bright Mixed Scintillators // Phys. Status Solidi A. 2018. V. 215. № 13. P. 1701034.
<https://doi.org/10.1002/pssa.201701034>
 17. Vishwnath V., Srinivas M., Patel N., Modia D., Murthy K.V.R. Optical properties of Eu(III) Doped Strontium Gadolinium Niobate Oxide // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1731. № 1. P. 110019.
<https://doi.org/10.1063/1.4948040>
 18. Wang X., Li X., Zhong H., Xu S., Cheng L., Sun J., Zhang J., Li L., Chen B. Up-Conversion Luminescence, Temperature Sensing Properties and Laser-Induced Heating Effect of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped YNbO₄ phosphors under 1550 nm excitation // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23981-4>
 19. Yildirim S., Demirci S., Ertekin K., Celik E., Alicikus Z.A. Production, Characterization, and Luminescent Properties of Eu³⁺ Doped Yttrium Niobate–Tantalate Films // J. Adv. Ceram. 2017. V. 6. P. 33–42.
<https://doi.org/10.1007/s40145-016-0215-z>
 20. Ivanova E.V., Masloboeva S.M., Kravets V.A., Orekhova K.N., Gusev G.A., Trofimov A.N., Shcherbina O.B., Yagovkina M.A., Averin A.A., Zamoryanskaya M.V. Synthesis and Luminescent Properties of Gadolinium Tantalum Niobates Gd(Nb_xTa_{1-x})O₄ // Opt. Spectrosc. 2019. V. 127. P. 1011–1017.
<https://doi.org/10.1134/S0030400X19120348>
 21. Hirano M., Dozono H. Synthesis of Luminescent Nanocrystals and Solid Solutions in the YNbO₄–EuNbO₄ System Via Hydrothermal Route // Mater. Res. Bull. 2014. V. 50. P. 213–220.
<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.10.041>
 22. Orekhova K.N., Eurov D.A., Kurdyukov D.A., Golubev V.G., Kirilenko D.A., Kravets V.A., Zamoryanskaya M.V. Structural and Luminescent Properties of Gd Oxide Doped with Eu³⁺ Embedded in Mesopores of SiO₂ particles // J. Alloys Compd. 2016. V. 678. P. 434–438.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.04.017>
 23. Ivanova E.V., Kravets V.A., Orekhova K.N., Gusev G.A., Popova T.B., Yagovkina M.A., Bogdanova O.G., Burakov B.E., Zamoryanskaya M.V. Properties of Eu³⁺-Doped Zirconia Ceramics Synthesized under Spherical Shock Waves and Vacuum Annealing // J. Alloys Compd. 2019. V. 808. 2019. P. 151778.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151778>
 24. Кравец В.А., Орехова К.Н., Яговкина М.А., Иванова Е.В., Заморянская М.В. Eu³⁺ как люминесцентный зонд для исследования структуры R₂O₃-материалов (R—Y, Eu и Gd) // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 2. С. 180–186.
<https://doi.org/10.21883/OS.2018.08.46356.54-18>
 25. Ельяшевич М.А. Спектры редких земель. М.: ГИТТЛ, 1953. 456 с.