

10

Низкотемпературный синтез стеклокерамики с кристаллитами $\text{YNbO}_4 : \text{Tb}^{3+}$

© В.А. Кравец, Е.В. Иванова, М.А. Яговкина, М.В. Заморянская

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: vladislav2033@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.04.2021 г.
В окончательной редакции 15.04.2021 г.
Принята к публикации 24.07.2021 г.

Целью работы являлся поиск оптимальных прекурсоров для синтеза стеклокерамики с кристаллическими включениями $\text{YNbO}_4 : \text{Tb}^{3+}$. В рамках работы исследованы включения, кристаллизовавшиеся в системе $\text{B}_2\text{O}_5 - \text{Na}_2\text{O} - \text{Y}_2\text{O}_3 - \text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{Tb}_4\text{O}_7$ (Bura). Показано, что в данной системе вне зависимости от прекурсоров в образцах кристаллизовался $\text{YNbO}_4 : \text{Tb}^{3+}$ в количестве более 70% от общей кристаллической компоненты. Наиболее перспективной для синтеза активированной стеклокерамики с YNbO_4 показала себя система, синтезированная из оксидных прекурсоров; в ней кристаллизовалось более 95% $\text{YNbO}_4 : \text{Tb}^{3+}$ от общей кристаллической компоненты. Люминесцентные свойства кристаллических включений исследованы с использованием метода локальной катодолуминесценции. Состав и структура стеклокерамики изучены методами рентгеноспектрального микроанализа и рентгенодифракционного фазового анализа.

Ключевые слова: YNbO_4 , люминесценция, ион тербия, стеклокерамика.

DOI: 10.21883/OS.2021.11.51642.2083-21

Введение

Ниобат иттрия, активированный редкоземельными ионами (РЗИ), является перспективным радиационно-стойким сцинтиллятором, в частности рентгенолюминофором. Такие материалы могут использоваться в медицинской и промышленной рентгенографии [1,2]. Перспективным направлением является разработка методов синтеза стеклокристаллических материалов, активированных РЗИ. Подобные гибридные материалы совмещают в себе свойства как стекла, так и кристаллов. Их синтез и последующая обработка аналогичны синтезу и обработке стекла, при этом уровень безызлучательных потерь при возбуждении люминесценции значительно ниже, чем в стеклах.

В работах [3,4] была показана возможность высокотемпературного синтеза стеклокристаллических материалов с кристаллитами ниобата иттрия. В ходе предыдущих исследований [5,6] было выявлено, что бор-натриевая оксидная матрица является крайне перспективной для низкотемпературного синтеза ниобата иттрия, легированного РЗИ.

Ниобат иттрия обладает высокой плотностью, что немаловажно при поглощении и преобразовании ионизирующего излучения в видимый свет, не гигроскопичен, а также обладает высокой радиационной и химической стойкостью. Кроме того, ниобат иттрия имеет собственную широкую полосу люминесценции в синем спектральном диапазоне, связанную с комплексом NbO_4^{3-} [7]. При возбуждении высокоэнергетическим излучением ниобата иттрия, дополнительно активированного РЗИ, происходит передача возбуждения с уровней, ответ-

ственных за собственную люминесценцию матрицы, на уровни РЗИ, что повышает выход люминесценции активатора при поглощении ионизирующего излучения [8,9].

В настоящей работе продолжают исследования по низкотемпературному синтезу ниобата иттрия в бор-натриевой матрице. В качестве активатора в настоящей работе используется Tb^{3+} . Ионы Tb^{3+} в кристаллах YNbO_4 обладают интенсивной люминесценцией в зеленом диапазоне спектра, связанной с энергетическими переходами с уровней 5D_4 [10,11].

Целью настоящей работы является поиск оптимальных прекурсоров для синтеза стеклокерамики с кристаллическими включениями $\text{YNbO}_4 : \text{Tb}^{3+}$. В рамках настоящей работы были исследованы включения, кристаллизовавшиеся в системе $\text{B}_2\text{O}_5 - \text{Na}_2\text{O} - \text{Y}_2\text{O}_3 - \text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{Tb}_4\text{O}_7$ (Bura). Исследование структуры, состава и оптических свойств синтезированных материалов выполнено методами рентгеновской дифракции (РДФА), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и локальной катодолуминесценции (КЛ) с пространственным разрешением от $1 \mu\text{m}$.

Синтез образцов

Для синтеза образцов использовали натрий-борную матрицу, поскольку она показала себя наиболее перспективной для синтеза стеклокерамики с YNbO_4 [5]. Натрий-борная матрица характеризуется относительно низкой температурой синтеза при стандартных условиях (от 900°C). Соединения иттрия, ниобия и тербия добавлялись в матрицу в та-

кой пропорции, чтобы в синтезируемом материале выполнялись следующие молярные соотношения в пересчете на оксиды: $M(\text{Tb}_2\text{O}_3)/M(\text{Y}_2\text{O}_3) \leq 0.2$ и $M(\text{Tb}_2\text{O}_3 + \text{Y}_2\text{O}_3)/M(\text{Nb}_2\text{O}_5) \sim 1$.

Первое соотношение определяется оптимальной концентрацией РЗИ в матрице ниобата иттрия, при которой наблюдается максимальная интенсивность излучения [1]. Второе соотношение выбрано таким образом, чтобы в результате синтеза керамики в ней образовался кристаллический YNbO_4 из расплава [12]. Для формирования кристаллитов в материале на завершающей стадии синтеза образцы медленно охлаждались в муфельной печи. В качестве исходных компонентов для варки стекол использовали реактивы чистотой не ниже 99%.

а) Образец Bura-Tb-1

Для синтеза образца Bura-Tb-1 была приготовлена многокомпонентная смесь: оксид иттрия, оксид ниобия, оксид тербия и натриевую соль борной кислоты смешивали в соотношениях, представленных в табл. 1, и помещали в керамический тигель для дальнейшей термообработки при 900°C .

б) Образец Bura-Tb-2

Для синтеза образца Bura-Tb-2 приготавливали многокомпонентную смесь путем растворения оксида тербия, оксида иттрия, хлорида ниобия и натриевой соли борной кислоты в азотной кислоте в соотношениях, указанных в табл. 2. Затем полученный состав высушивали в сушильном шкафу при 100°C до удаления жидкой составляющей. Высушенную массу нагревали в течение 15 min при 500°C , измельчали до порошкообразного состояния и засыпали в керамический тигель для последующего плавления при 900°C .

в) Образец Bura-Tb-3

Для синтеза образца Bura-Tb-3 смесь исходных компонентов, предназначенную для дальнейшей термической обработки, получали следующим образом: нитрат тербия, нитрат иттрия и хлорид ниобия растворяли в изопропиловом спирте в соотношениях, указанных в табл. 3.

В полученную смесь добавляли тетраборат натрия, тщательно перемешивали и высушивали в сушильном шкафу при 100°C до удаления спиртовой составляющей. В результате получили порошкообразную массу, которую засыпали в керамический тигель для последующего плавления при 900°C .

Завершающая стадия синтеза всех образцов производилась в муфельной печи в следующем режиме: нагрев до 900°C — 1 h, выдержка при 900°C — 30 min и постепенное охлаждение до комнатной температуры в течение 3.5 h. Также стоит отметить, что для всех образцов происходило разовое добавление материала шихты в тигель во время завершающей стадии синтеза, когда температура внутри печи достигала 600°C .

Таблица 1. Состав образца Bura-Tb-1

Компоненты	Масса, g	wt%	mol%
Tb_4O_7	0.16	2.6	0.7
Y_2O_3	0.47	7.6	7.1
Nb_2O_5	0.675	10.9	8.7
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	4.9	79.0	83.4

Таблица 2. Состав образца Bura-Tb-2

Компоненты	Масса, g	wt%	mol%
Tb_4O_7	0.19	1.6	0.4
Y_2O_3	0.565	4.7	4.4
NbCl_5	1.65	13.7	10.7
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	9.65	80.0	84.4

Таблица 3. Состав образца Bura-Tb-3

Компоненты	Масса, g	wt%	mol%
$\text{Tb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.113	1.9	1.2
$\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.47	7.9	6.1
NbCl_5	0.41	6.9	5.4

Методы исследования

Однородность образцов и наличие включений исследовались в оптическом микроскопе КЛ-системы. Для определения элементного состава образцов использовался метод РСМА. Люминесцентные свойства исследовались методом КЛ. Наличие кристаллических включений в образцах определялось методом РДФА. Распределение кристаллических конгломератов в образце исследовалось в КЛ-микроскопе.

РДФА-исследования проводились на рентгеновском дифрактометре D2 Phaser (Bruker, Германия). Для идентификации кристаллической компоненты в образцах использовались данные Inorganic Crystal Structure Database (ICSD): YNbO_4 Fergusonite — beta (Y) 00-023-1486, NaCl Halite 01-080-3939, NaNbO_3 Sodium niobite (V) 01-077-0261, Y_2O_3 01-076-0151 и YBO_3 Yttrium borate 01-074-1929.

Для исследования образцов методами КЛ и РСМА использовался электронно-зондовый микроанализатор САМЕВАХ (Cameca, Франция), совмещенный с КЛ-станцией оригинальной конструкции [13]. Используемое оборудование позволяет получать спектры с латеральным разрешением от $1\ \mu\text{m}$, что дает возможность исследовать однородность люминесцентных свойств образцов и КЛ-изображения, по которым можно оценить однородность КЛ-образца и размеры включений от $\sim 1\ \mu\text{m}$. Спектры КЛ были получены при ускоряющем напряжении электронов 20 kV, поглощенном токе 10 nA и диаметре электронного пучка $3\ \mu\text{m}$. При таком ускоряющем

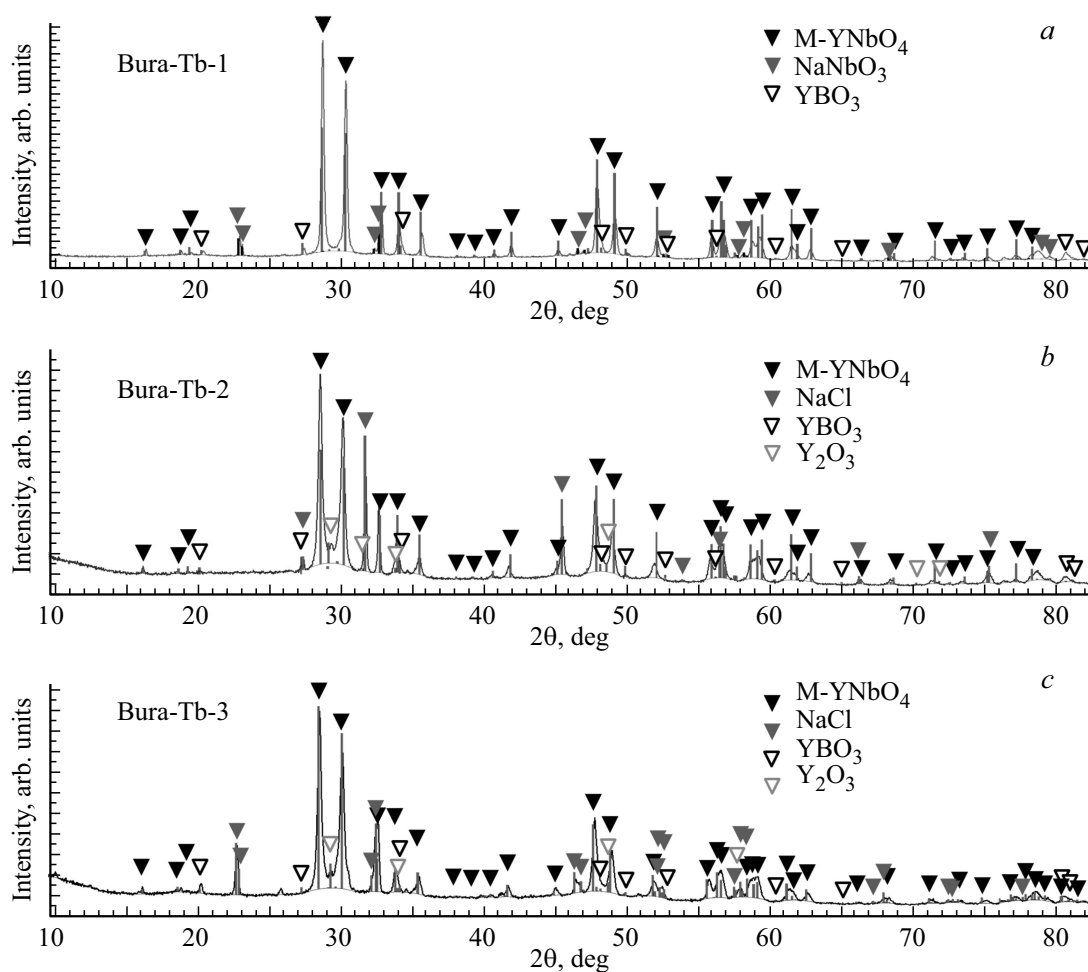


Рис. 1. Дифракционные кривые образцов Bura-Tb-1 (a), Bura-Tb-2 (b), Bura-Tb-3 (c).

напряжении область генерации КЛ имеет глубину порядка $3\ \mu\text{m}$. КЛ-изображения были получены при диаметре электронного пучка $200\ \mu\text{m}$, ускоряющем напряжении электронов $20\ \text{kV}$ и поглощенном токе $20\ \text{nA}$.

Локальность метода РСМА, так же как и метода КЛ, может варьировать в диапазоне от 1 до $200\ \mu\text{m}$. Измерение состава образцов проводилось при ускоряющем напряжении электронов $20\ \text{kV}$, поглощенном токе $15\ \text{nA}$ и диаметре электронного пучка $3\ \mu\text{m}$. Для измерения Y, Nb и Tb в качестве эталонов использовались соединения Nb, $Y_3Al_5O_{12}$ и $TbPO_4$. Содержание кислорода рассчитывалось по стехиометрии. В связи с тем, что не было возможности измерения Na, содержание элементов рассчитывалось из предположения, что матрица состояла из оксида бора. Данное приближение было сделано исходя из того, что поглощение Na- и B-характеристических линий измеряемых элементов слабо отличается. Для каждого образца было проведено не менее пяти анализов состава матрицы в случайных областях. Это позволило получить усредненный элементный состав и оценить однородность распределения элементов в образцах.

КЛ- и РСМА-исследования проводятся на одном приборе, что позволяет анализировать состав и регистрировать спектры КЛ в одной и той же области образца. Это упрощает интерпретацию контраста КЛ-изображений.

Результаты и обсуждения

РДФА

Результаты РДФА синтезированных образцов представлены на рис. 1 и в табл. 4. Показано, что в каждом из образцов содержатся различные кристаллические включения. Детектированные кристаллические фазы и их содержание в относительных процентах от общей кристаллической фазы в образце приведены в табл. 4.

Также на дифракционных кривых для всех образцов Bura-Tb регистрируются широкие „гало“ в диапазоне 15° – 22° , 25° – 38° и 40° – 55° углов 2θ , характерные для рентгеноаморфной компоненты образца (рис. 1, a, b, c).

Были расшифрованы пики на дифракционных кривых для всех образцов. Было определено, что во всех образцах кристаллизовался $YNbO_4$, однако помимо него кристаллизовались и другие соединения ($NaNbO_3$, YBO_3 ,

Таблица 4. Характеристики идентифицированных кристаллических включений

Образец	РДФА-анализ кристаллической фазы образцов		КЛ-микроскопия	РСМА
	Кристаллическая фаза	Относительный процент от общей кристаллической фазы в образце	Доля включений на поверхности образца, %	Состав идентифицированных кристаллитов
Bura-Tb-1	M-YNbO ₄	≥ 95	≥ 50	(Y _{0.77} Tb _{0.23})NbO ₄
	NaNbO ₃	≤ 3	–	–
	YBO ₃	≤ 2	~ 1	(Y _{0.83} Tb _{0.17})BO ₃
Bura-Tb-2	M-YNbO ₄	~ 70	≥ 50	(Y _{0.79} Tb _{0.21})NbO ₄
	NaCl	~ 25	–	–
	YBO ₃	≤ 3	~ 1	(Y _{0.82} Tb _{0.18})BO ₃
	Y ₂ O ₃	≤ 3	–	–
Bura-Tb-3	M-YNbO ₄	~ 70	≥ 50	(Y _{0.77} Tb _{0.23})NbO ₄
	NaNbO ₃	~ 25	–	–
	Y ₂ O ₃	≤ 3	–	–
	YBO ₃	≤ 2	–	–

NaCl, Y₂O₃). Это говорит о том, что необходима дальнейшая оптимизация условий синтеза. Кристаллизация NaCl в образце Bura-Tb-2 свидетельствует о недостаточной температуре синтеза. В образце Bura-Tb-1 образовалось более 95% кристаллической M-YNbO₄-фазы, это существенно больше, чем в образцах Bura-Tb-2 и Bura-Tb-3.

КЛ-микроскопия и РСМА-исследования

На рис. 2 представлены КЛ-изображения образцов. На КЛ-изображениях всех образцов наблюдаются однородные области (отмечены окружностью на рис. 2). Также на КЛ-изображениях всех образцов (рис. 2) наблюдается цветовой контраст, характерный для микронных и субмикронных кристаллических включений, легированных Tb³⁺. Доля включений, наблюдаемая на КЛ-изображении поверхности образцов, и их состав, измеренный методом РСМА, представлены в табл. 4.

На КЛ-изображении образца Bura-Tb-1 (рис. 2, а) наблюдаются два типа включений. Первый тип (I) включений обладает значительно более интенсивной КЛ (отмечены на рис. 2, а стрелочкой). Такие включения встречаются крайне редко (менее 1% от исследуемой области образца). По данным РСМА в данных включениях отсутствовал Nb, в значительных количествах регистрировались Y и Tb, средняя концентрация Tb составляла 17 ± 1 at% по Y. Второй тип (II) включений представляет из себя конгломераты с латеральным размером от 10 до 100 μm, неравномерно распределенные по образцу и покрывающие порядка 50% наблюдаемой площади образца. По данным РСМА включения имеют

состав (Y,Tb)NbO₄ с концентрацией Tb 23 ± 1 at% по Y. В области без видимых включений (отмечены кругом на рис. 2) было измерено содержание Nb, Y и Tb. Их содержание составило 0.7 ± 0.2, 3 ± 0.5 и 0.5 ± 0.2 wt% соответственно. Данные приведены в табл. 4.

В образце Bura-Tb-2, так же как и в Bura-Tb-1, наблюдалось два типа включений. Данные включения аналогичны по своим люминесцентным свойствам включениям, встречаемым в Bura-Tb-1. Первый тип (I) включений (отмечены на рис. 2, b стрелочкой) занимает менее 1% от исследуемой области образца. По данным РСМА в данных включениях отсутствовал Nb, средняя концентрация Tb составляла 18 ± 1 at% по Y. Второй тип (II) включений представляет собой области (с латеральным размером более 400 μm), которые наблюдаются на более чем 50% поверхности образца. В данных областях кристаллиты визуальнo распределены равномерно с учетом локальности метода в несколько μm. По данным РСМА данные включения имеют состав (Y,Tb)NbO₄ с концентрацией Tb 21 ± 1 at% по Y. В области без включений (отмечены кругом на рис. 2, b) содержание Nb составило 4 ± 1 wt%, содержание Y и Tb крайне мало и не регистрируется прибором.

В образце Bura-Tb-3 наблюдался только второй тип (II) включений (рис. 2, c). Включения неравномерно распределены по значительной части исследуемой области образца. По данным РСМА данные включения имеют состав (Y,Tb)NbO₄ с концентрацией Tb 23 ± 1 at% по Y. В области без включений содержание

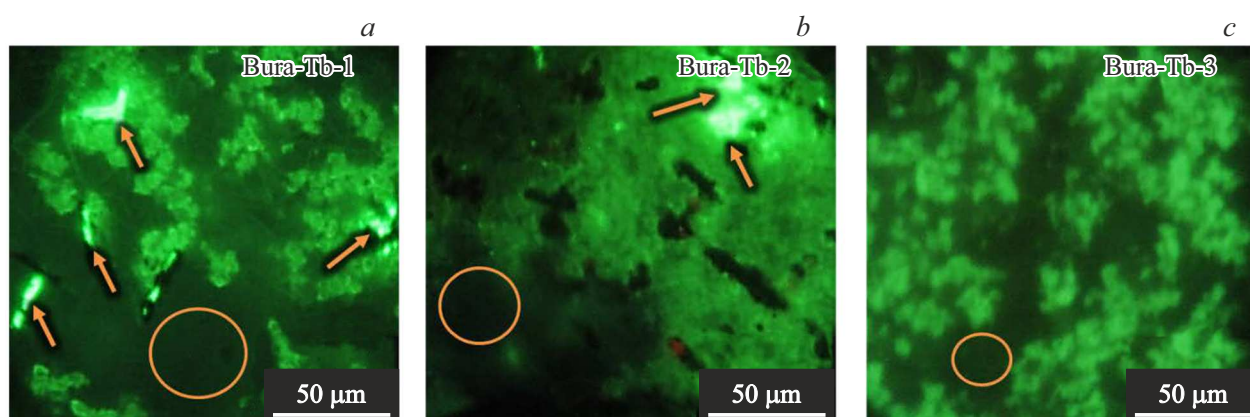


Рис. 2. КЛ-изображения образцов (a) Bura-Tb-1, (b) Bura-Tb-2 и (c) Bura-Tb-3.

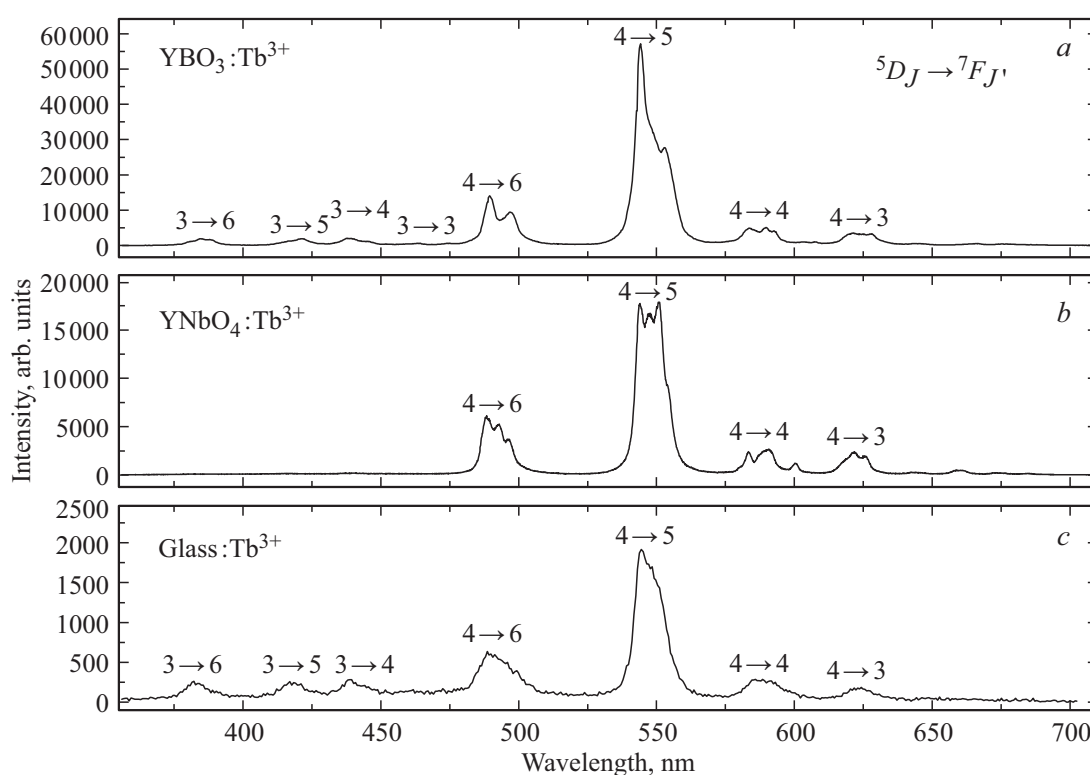


Рис. 3. КЛ-спектры в линейном масштабе, характерные для включений (a) первого типа (I), (b) второго типа (II), (c) из областей без включений. В КЛ-спектрах над полосами, связанными с энергетическими переходами Tb^{3+} , указаны соответствующие квантовые числа $J \rightarrow J'$.

Nb составило 3 ± 1 wt%, содержание Y и Tb крайне мало и не регистрируется прибором.

Спектры КЛ

На рис. 3, a, b, c представлены спектры КЛ, характерные для определенных областей всех образцов. Также для более детального анализа спектры представлены в полулогарифмическом масштабе (рис. 4, a, b, c). Расшифровка спектров производилась в соответствии с работой [14].

Спектры КЛ включений первого типа (I) представлены на рис. 3, a и 4, a (данные включения встречаются в образцах Bura-Tb-1 и Bura-Tb-2 и отмечены на рис. 2 стрелочками).

Суммируя данные РФФА, РСМА и КЛ, можно с уверенностью сказать, что включения первого типа (I), обнаруженные в образцах Bura-Tb-1 и Bura-Tb-2, представляют собой кристаллические включения $YBO_3:Tb^{3+}$. В представленных КЛ-спектрах данных включений (рис. 3, a и 4, a) наблюдаются полосы, связанные с энергетическими переходами Tb^{3+} с уровней $^5D_3-^7F_J$

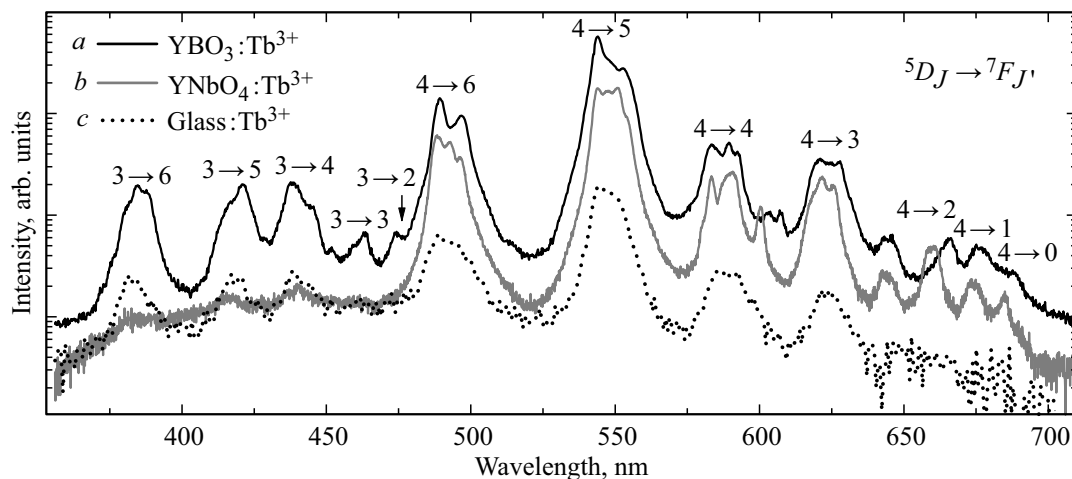


Рис. 4. КЛ-спектры в полулогарифмическом масштабе, характерные для включений (а) первого типа (I), (b) второго типа (II), (c) из областей без включений. В КЛ-спектрах над полосами, связанными с энергетическими переходами Tb^{3+} , указаны соответствующие квантовые числа $J \rightarrow J'$.

($J = 6, 5, 4, 3, 2$) и ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0$). Форма спектра соответствует спектру Tb^{3+} в YBO_3 [15], где РЗИ замещают ионы Y с локальной позицией S_6 [16,17].

Спектры люминесценции на рис. 3, b и 4, b соответствуют включениям второго типа (II). Данные включения встречаются во всех образцах. Также суммируя данные РДФА, РСМА и КЛ, можно заключить, что включения второго типа (II) являются кристаллитами $YNbO_4:Tb^{3+}$. В представленных КЛ-спектрах данных включений (рис. 3, b и 4, b) наблюдаются полосы, связанные с энергетическими переходами Tb^{3+} с уровней ${}^5D_3 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 6, 5, 4$) и ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0$), при этом переходы с уровня 5D_3 имеют крайне низкую интенсивность КЛ и заметны только в полулогарифмическом масштабе. Форма спектра соответствует спектру Tb^{3+} в $YNbO_4$ [10,11], где РЗИ замещают ионы Y с локальной позицией C_2 [5].

КЛ-спектры, представленные на рис. 3, c и 4, c, получены в областях без включений (отмечены окружностями на рис. 2). В этих спектрах наблюдаются полосы, связанные с энергетическими переходами Tb^{3+} с уровней ${}^5D_3 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 6, 5, 4$) и ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_J$ ($J = 6, 5, 4, 3$). Форма спектра соответствует спектру Tb^{3+} в боратных стеклах [18], где РЗИ занимают локальные позиции, близкие к C_{2v} [16].

Полученные спектры соответствуют излучению тербия в материалах с разной локальной симметрией (рис. 3 и 4). Методом КЛ удалось подтвердить, что во всех образцах кристаллизовались включения ниобата иттрия, активированного Tb^{3+} — включения второго типа (II). Также удалось подтвердить наличие включений бората иттрия, активированного Tb^{3+} (включения первого типа (I)) в образцах Вуга-Tb-1 и Вуга-Tb-2.

Заключение

Впервые синтезированы низкотемпературные стеклокерамики с $YNbO_4$, легированные Tb, на основе перспективной натрий-боратной матрицы из различных прекурсоров. Из представленных результатов видно, что при синтезе из различных прекурсоров в образцах дополнительно могут образоваться кристаллиты $NaCl$, $NaNbO_3$, Y_2O_3 и YBO_3 . Во всех образцах содержание $M-YNbO_4$ не менее 70% от общей кристаллической фазы в образце. Также показано, что наибольший относительный процент $M-YNbO_4$ получается при синтезе из оксидных компонентов, что делает этот способ синтеза наиболее перспективным. Показано, что Tb входит в кристаллиты $YNbO_4$ в количестве 21–23 ат% по Y.

Благодарности

РДФА-исследования выполнены с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021). Авторы благодарны М.И. Москвичеву и В.В. Васкевичу за предоставленные образцы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Местер А.Ю., Местер А.Ю., Можаров А.М., Трофимов А.Н., Заморянская М.В. // Опт. и спектр. 2016. Т. 120. № 5. С. 768–774.

- [2] *Nazarov M., Kim Y.J., Lee E.Y., Min K.I., Jeong M.S., Lee S.W., Noh D.Y.* // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. N 10. P. 103104.
- [3] *Dymshits O.S., Alekseeva I.P., Zhilin A.A., Tsenter M.Y., Loiko P.A., Skoptsov N.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V., Mateos X., Baranov A.V.* // J. Lumin. 2015. V. 160. P. 337–345.
- [4] *Loiko P.A., Dymshits O.S., Alekseeva I.P., Zhilin A.A., Tsenter M.Y., Vilejshikova E.V., Yumashev K.V.* // J. Lumin. 2016. V. 179. P. 64–73
- [5] *Кравец В.А., Иванова Е.В., Орехова К.Н., Гусев Г.А., Васильевич В.В., Москвичёв М.И., Загорянская М.В.* // Опт. и спектр. 2021. Т. 29. № 2. С. 207–213.
- [6] *Kravets V.A., Ivanova E.V., Zamoryanskaya M.V.* // J. Phys.: Conference Series. 2020. V. 1697. N 1. P. 012163.
- [7] *Dačanić L.R., Lukić-Petrović S.R., Petrović D.M., Nikolić M.G.* // J. Lumin. 2014. V. 151. P. 82–87.
- [8] *Blasse G., Bril A.* // J. Electrochem. Soc. 1968. V. 115. P. 1067–1075.
- [9] *Blasse G., Bril A.* // J. Lumin. 1970. V. 3. P. 109–131.
- [10] *Liu X., Lü Y., Chen C., Luo S., Zeng Y., Zhang X., Lin J.* // J. Phys. Chem. C. 2014. V. 118. P. 27516–27524.
- [11] *Boutinaud P., Cavalli E., Bettinelli M.* // J. Phys.: Condensed Matter. 2007. V. 19. N 38. P. 386230.
- [12] *Галахов Ф.Я.* Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов. Справочник. Вып. 5. Ч. 2. Наука, 1986.
- [13] *Zamoryanskaya M.V., Konnikov S.G., Zamoryanskii A.N.* // Instrum. Exp. Tech. 2004. V. 47. P. 477–483.
- [14] *Leavitt R.P., Gruber J.B., Chang N.C., Morrison C.A.* // J. Chem. Phys. 1982. V. 76. P. 4775–4788.
- [15] *Sato R., Takeshita S., Isobe T., Sawayama T., Niikura S.* // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2012. V. 1. N 6. P. R163.
- [16] *Kravets V.A., Ivanova E.V., Orekhova K.N., Petrova M.A., Gusev G.A., Trofimov A.N., Zamoryanskaya M.V.* // J. Lumin. 2020. V. 226. P. 117419.
- [17] *Yin X., Zhao Q., Shao B., Lv W., Li Y., You H.* // Cryst. Eng. Commun. 2014. V. 16. P. 5543.
- [18] *Wada N., Kojima K.* // Opt. Mat. 2013. V. 35. N 11. P. 1908–1913.