

Спектрально-люминесцентные свойства эпитаксиальных пленок гадолиний-галлиевого граната, легированных тербием

© Н.В. Васильева, В.В. Рандошкин, В.Н. Колобанов*, Е.Б. Крюкова**, В.В. Михайлин*,
Н.Н. Петровнин*, В.Г. Плотниченко**, Ю.Н. Пырклов**, Д.А. Спасский***, Н.Н. Сысов*

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

** Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

*** Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119992 Москва, Россия

E-mail: natashav@ok.ru

(Поступила в Редакцию 9 ноября 2005 г.)

Методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава на основе системы $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ выращены монокристаллические Tb-содержащие пленки гадолиний-галлиевого граната. В этих материалах исследованы оптическое поглощение в диапазоне длин волн от 0.2 до $10\ \mu\text{m}$ и люминесценция при возбуждении синхротронным излучением с энергией 3.5–30 eV при температурах 10 и 300 К. Обнаружена полоса поглощения с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.260\ \mu\text{m}$, соответствующая разрешенному по спину электрическому дипольному переходу между электронными конфигурациями $4f^8(^7F_6) \rightarrow 4f^7(^8S)5d$ ионов Tb^{3+} . В диапазоне длин волн от 1.7 до $10\ \mu\text{m}$ наблюдаются узкие малоинтенсивные полосы поглощения $4f \rightarrow 4f$ -переходов с основного уровня 7F_6 иона Tb^{3+} на уровни мультиплетов $^7F_{0-5}$. В спектрах люминесценции при 10 К наиболее интенсивной является полоса с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.544\ \mu\text{m}$, связанная с излучательным переходом $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в ионе Tb^{3+} .

Работа выполнена при поддержке грантов DFG 436 RUS 113/437 и НШ 1771.2003.2.

PACS: 78.20.Ci, 78.40.-q

1. Введение

Тербийсодержащие монокристаллы гранатов представляют интерес для разработчиков лазеров видимого и ИК-диапазонов. В последнее время наблюдается большой интерес к созданию эффективных сцинтилляционных рентгеновских экранов с высоким пространственным разрешением, которые можно создать только на основе пленок [1–3]. Монокристаллические пленки толщиной 0.1– $100\ \mu\text{m}$, в частности со структурой граната, можно вырастить методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) из переохлажденного раствора-расплава на изоморфных подложках [3–5]. В качестве растворителя в этом методе чаще всего используют системы $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$ или $\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$. Основным отличием эпитаксиальных пленок от их объемных аналогов, выращиваемых, например, по методу Чохральского является входение в состав пленки примесных ионов Pb^{2+} , пары ионов Pb^{2+} и Pb^{4+} , ионов Bi^{3+} из растворителя [6–8], а также ионов Pt^{4+} из платинового тигля. Примесные ионы в выращенных эпитаксиальных пленках по сравнению с подложкой дают дополнительные полосы поглощения. В частности, при гомоэпитаксии в гадолиний-галлиевых пленках, выращенных на подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ) из Pb-содержащего раствора-расплава при малом

переохлаждении, появляется полоса поглощения с максимумом на длине волны $0.280\ \mu\text{m}$, которая связана с электронным переходом $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ примесных ионов Pb^{2+} ($6s^2$), а при большом переохлаждении дополнительно возникают полосы поглощения, обусловленные межвалентными парными переходами ионов Pb^{2+} и Pb^{4+} ($\text{Pb}^{2+} + \text{Pb}^{4+} + h\nu \rightarrow \text{Pb}^{3+} + \text{Pb}^{3+}$) ($0.550\ \mu\text{m}$) и переходами с переносом заряда $\text{O}^{2-} + \text{Pb}^{4+} + h\nu \rightarrow \text{Pb}^{3+} + V_{\text{O}_2-}$ ($0.325\ \mu\text{m}$), где V_{O_2-} — вакансия кислорода [7]. В последнем случае пленки приобретают фиолетовую окраску. В пленках, выращенных на подложках ГГГ из Bi-содержащего раствора-расплава, дополнительное поглощение связано с электронным переходом $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ примесных ионов Bi^{3+} ($6s^2$) с максимумом на длине волны $0.290\ \mu\text{m}$ [8].

Спектроскопические свойства иона Tb^{3+} изучались как в монокристаллах (см., например, работы [9,10]), так и в стеклах [11,12]. Были исследованы межконфигурационные $4f-5d$ -переходы [13,14] и $f-f$ -переходы [15,16]. Оптическое поглощение иона Tb^{3+} в эпитаксиальных пленках ГГГ, насколько нам известно, не исследовалось.

Целью настоящей работы является исследование спектрально-люминесцентных свойств монокристаллических Tb-содержащих пленок ГГГ, выращенных методом ЖФЭ.

2. Рост пленок

Эпитаксиальные пленки выращивались методом ЖФЭ из переохлажденного раствора-расплава на основе системы $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ на подложках ГГГ с ориентацией (111). Раствор-расплав гомогенизировался при температуре 1100°C в платиновом тигле не менее 4 h, после чего его температура снижалась до температуры роста T_g пленок. Состав шихты характеризовался следующими мольными отношениями (R_1, R_2, R_3):

$$R_1 = [\text{Ga}_2\text{O}_3]/\Sigma[\text{Ln}_2\text{O}_3] \approx 14.42,$$

$$R_2 = [\text{PbO}]/[\text{B}_2\text{O}_3] \approx 16.03,$$

$$R_3 = (\Sigma[\text{Ln}_2\text{O}_3] + [\text{Ga}_2\text{O}_3]) / (\Sigma[\text{Ln}_2\text{O}_3] + [\text{Ga}_2\text{O}_3] + [\text{PbO}] + [\text{B}_2\text{O}_3]) \approx 0.08,$$

где $\Sigma[\text{Ln}_2\text{O}_3] = [\text{Ga}_2\text{O}_3] + [\text{Tb}_4\text{O}_7] + [\text{La}_2\text{O}_3]$, а формулы соединений в квадратных скобках обозначают концентрации соответствующих оксидов (в mol.%).

Было выращено шесть серий Tb-содержащих гранатовых пленок (по четыре-семь образцов в каждой) с расчетной концентрацией тербия от 3.3 до 90 at.% (табл. 1). Время роста составляло 5 min или 1 h. Скорость вращения подложки при росте пленок составляла 50 rpm. Максимальная скорость роста f_g достигала в экспериментах $1.12 \mu\text{m}/\text{min}$, а максимальная толщина пленки $h_{\text{max}} = 53.3 \mu\text{m}$. Известно, что для выращивания эпитаксиальных гранатовых пленок высокого оптического качества необходимо максимальное соответствие параметров элементарной ячейки пленки a_0^f и подложки a_0^s , т. е. должно выполняться неравенство

$$|a_0^s - a_0^f| \leq 0.001 \text{ nm}. \quad (1)$$

Параметр решетки подложки из ГГГ $a_0^G = 1.2383 \text{ nm}$, а параметр решетки $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ составляет $a_0^{\text{TbG}} = 1.2345 \text{ nm}$, поэтому для согласования параметров ре-

Таблица 1. Условия роста эпитаксиальных пленок состава $(\text{Tb,La,Gd})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$

Номер серии (состав шихты)	$C(\text{Tb})$, at. %	K_{La}	ΔT , °C	h_{max} , μm
I	3.3	—	1022–1006	53.3
II	10	0.25	1010–992	37.3
III	30	0.25	1039–1019	48.1
IV	30	0.15	1036–1013	33.5
V	30	0.05	991–975	32.8
VI	90	0.05	970–930	23.3

Примечание. $C(\text{Tb})$ — расчетная концентрация тербия в эпитаксиальной пленке, K_{La} — коэффициент распределения лантана.

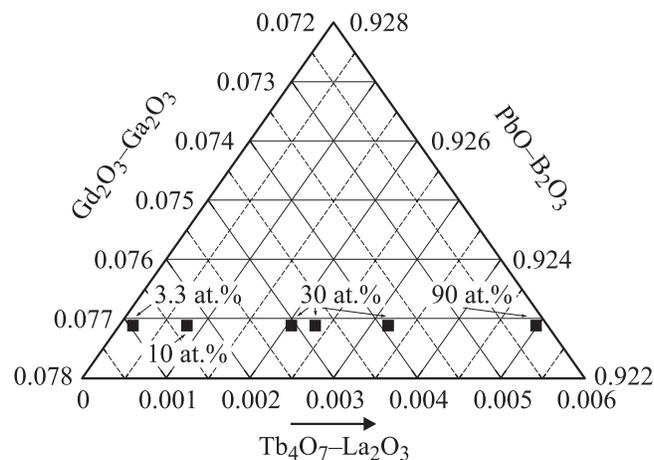


Рис. 1. Фрагмент концентрационного треугольника псевдотройной системы $(\text{Tb}_4\text{O}_7\text{-La}_2\text{O}_3)\text{-}(\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3)\text{-}(\text{PbO-B}_2\text{O}_3)$.

шеток эпитаксиальных пленок состава $(\text{Tb,Gd})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ и подложки ГГГ в шихту вводили La_2O_3 . При расчете шихты использовались коэффициенты распределения Gd и Tb, равные соответственно 1.50 и 1.58. Для каждой серии был экспериментально определен интервал температур ΔT , в котором расположена температура насыщения T_s (табл. 1). С ростом концентрации Tb_4O_7 температура насыщения раствора-расплава понижалась, и интервал температур, в котором имел место эпитаксиальный рост пленок, сужался и смещался в область более низких температур. В каждой серии, кроме последних двух, было выращено по две толстые пленки ($h > 10 \mu\text{m}$) (с разной степенью переохлаждения): первая — при переохлаждении, обеспечивающем входение только примесных ионов Pb^{2+} , вторая — при переохлаждении, обеспечивающем входение пары ионов Pb^{2+} и Pb^{4+} . Выращенные тонкие пленки были бесцветными и содержали небольшое количество трещин; толстые пленки при малом переохлаждении были бесцветными, а при большом переохлаждении имели фиолетовый оттенок. Количество трещин в толстых пленках возрастало с ростом концентрации оксида тербия из-за несоответствия между параметрами решеток пленки и подложки. В сериях V и VI толстые пленки были матовыми. Параметры эпитаксиальных монокристаллических пленок состава $(\text{Tb,La,Gd})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ приведены в табл. 2.

На рис. 1 показан фрагмент концентрационного треугольника псевдотройной системы $(\text{Tb}_4\text{O}_7\text{-La}_2\text{O}_3)\text{-}(\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3)\text{-}(\text{PbO-B}_2\text{O}_3)$. По осям отложены мольные доли оксидов в шихте. Темные квадраты — расчетные составы шихты растворов-расплавов, из которых выращивали эпитаксиальные монокристаллические Tb-содержащие гранатовые пленки с концентрацией тербия от 3.3 до 90 at.% (условия роста пленок приведены в табл. 1).

3. Эксперимент

При проведении экспериментов использовались термодпары Ле Шателье (Pt/Pt10Rh). Суммарная толщина $2h$ пленок на обеих сторонах подложках и скорость роста пленки f_g рассчитывалась так же, как в работах [7,8] (табл. 2).

Спектры пропускания пленок при комнатной температуре измерялись с шагом 1 nm в диапазоне от 0.2 до $2.5 \mu\text{m}$ с помощью спектрофотометра Lambda 900 фирмы Perkin-Elmer, а в диапазоне от 1.7 до $10 \mu\text{m}$ ($6000-1000 \text{ cm}^{-1}$) — с разрешением 2 cm^{-1} с помощью Фурье-спектрометра IFS-113v фирмы Bruker. Спектры поглощения пленок рассчитывались на основе спек-

тров пропускания следующим образом: сначала спектр пропускания подложки, измеренный до выращивания, делили на спектр пропускания подложки с выращенными на ней пленками, а затем натуральный логарифм этого отношения делили на суммарную толщину пленок, выросших с обеих сторон подложки.

Спектры люминесценции с разрешением 10 nm при возбуждении синхротронным излучением (СИ) с энергией 3.5–30 eV измерялись на экспериментальной установке Superlumi, расположенной в канале СИ в DESY (Гамбург, Германия), при температурах 10 и 300 К. Люминесценция регистрировалась в области длин волн от 200 до 750 nm вторичным монохроматором ARC SpectraPro SP-308, использовавшимся в режиме спектрографа. Полученные спектры нормировались на функцию спектральной чувствительности тракта регистрации.

Таблица 2. Параметры эпитаксиальных монокристаллических пленок состава $(\text{Tb}, \text{La}, \text{Gd})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$

Номер образца	$T_g, ^\circ\text{C}$	$2h, \mu\text{m}$	$f_g, \mu\text{m}/\text{min}$	$\Delta\lambda, \text{cm}^{-1}$
I-1	1006	3.0	0.30	1912
I-2	989	11.0	1.10	3641
I-3	968	11.2	1.12	2743
I-4	951	5.8	0.58	3279
I-5	918	4.0	0.40	3534
I-6	971	106.6	0.89	—
I-7	920	90.7	0.76	—
II-1	992	4.2	0.42	3153
II-2	977	7.9	0.79	3054
II-3	958	6.3	0.63	2346
II-4	941	5.7	0.57	3332
II-5	978	74.4	0.62	—
II-6	924	74.5	0.62	—
III-1	1019	3.4	0.34	—
III-2	1000	10.3	1.03	—
III-3	981	8.3	0.83	—
III-4	965	4.5	0.45	—
III-5	946	3.6	0.36	—
III-6	1000	46.8	0.39	—
III-7	944	96.2	0.80	—
IV-1	1013	7.2	0.72	—
IV-2	993	5.3	0.53	—
IV-3	973	4.0	0.40	—
IV-4	953	3.4	0.34	—
IV-5	989	67.0	0.58	—
IV-6	932	58.3	0.49	—
V-1	975	2.5	0.25	3664
V-2	953	5.2	0.52	3595
V-3	933	4.8	0.48	2349
V-4	952	65.7	0.36	—
VI-1	930	2.7	0.27	3139
VI-2	909	3.2	0.32	3905
VI-3	892	5.5	0.55	2865
VI-4	876	4.6	0.46	2929
VI-5	914	46.6	0.39	—

Примечание. $\Delta\lambda$ — ширина линии поглощения на ее полувысоте, при этом максимум данной линии находится на 260 nm.

4. Результаты измерений и обсуждение

Считается, что ион Tb^{3+} наряду с гадолинием и лантаном входит в додекаэдрическую подрешетку граната $\{\text{Tb}, \text{La}, \text{Gd}\}_3[\text{Ga}]_2(\text{Ga})_3\text{O}_{12}$ и имеет орторомбическую симметрию, которая описывается точечной группой D_2 (222) [17,18]. Ион Tb^{3+} является некрамерсовским ионом, так как имеет четное число $4f$ -электронов [18]. Его основной конфигурации $4f^8$ соответствует основной уровень 7F_6 ($L = 3, S = 3$); возбужденными конфигурациями являются $4f^75d$, $4f^76s$, $4f^76p$. Электронной конфигурации $4f^7({}^8S)5d$ свободного иона Tb^{3+} соответствуют два мультиплета ${}^7D_{5-1}$ со спиновым числом $S = 3$ и ${}^9D_{2-6}$ с $S = 4$ [11,13,19]. Переходы с основного уровня 7F_6 ($S = 3$) на уровни возбужденной конфигурации с $S = 4$ запрещены по спину, а переходы между уровнями одинаковой мультиплетности с $S = 3$ разрешены [11,13]. Наиболее интенсивными оказываются переходы между электронными состояниями с одинаковой спиновой мультиплетностью. Поэтому в спектрах поглощения исследуемых пленок в области средневолнового ультрафиолета должны наблюдаться интенсивные широкие полосы поглощения перехода ${}^7F_6 \rightarrow {}^7D_{5-1}$. В исследуемых пленках мультиплеты некрамерсовского иона Tb^{3+} в кристаллическом поле с симметрией D_2 расщепляются на синглеты; в частности, основной уровень 7F_6 с $J = 6$ расщепляется на тринадцать синглетов, причем некоторые синглетные уровни располагаются достаточно близко друг к другу, образуя квазидублеты [18], поэтому расшифровка оптических спектров затруднена.

В спектрах поглощения исследуемых тонких пленок в диапазоне длин волн от 0.200 до $0.450 \mu\text{m}$ наблюдаются полосы поглощения с максимумами при 0.260, 0.280 и $0.340 \mu\text{m}$ (рис. 2). Широкая (полуширина приведена в табл. 2) полоса поглощения с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.260 \mu\text{m}$ соответствует разрешенному электрическому дипольному переходу между электронными конфигурациями $4f^8({}^7F_6) \rightarrow 4f^7({}^8S)5d({}^7D)$ ионов

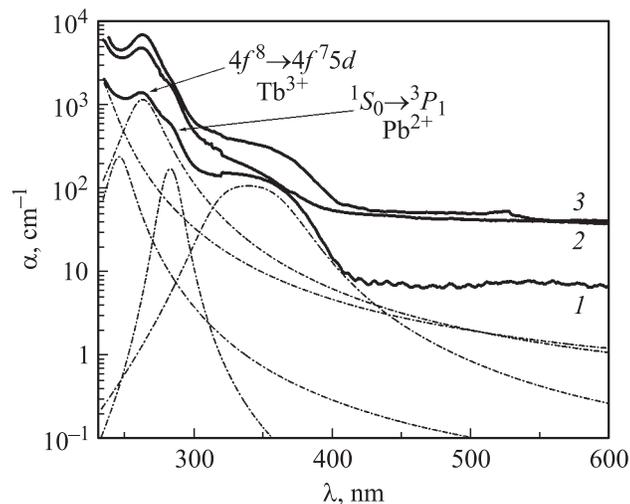


Рис. 2. Спектры оптического поглощения $\alpha(\lambda)$ для образцов эпитаксиальных пленок № I-2 (1), II-2 (2) и V-2 (3) при 300 К с примером разложения спектра 1 на составляющие для более точного определения положений линий поглощения. Нумерация пленок соответствует табл. 2.

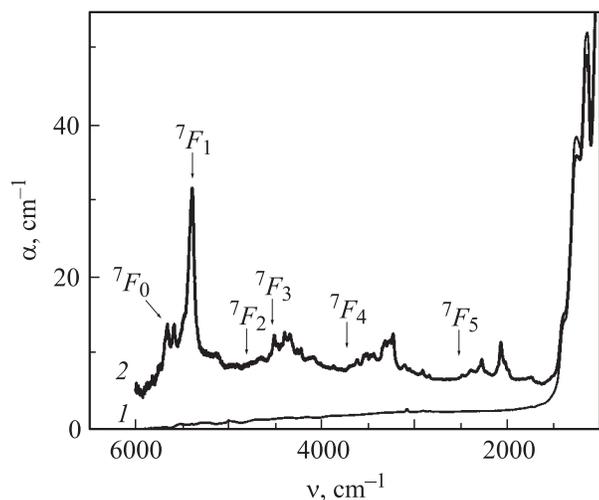


Рис. 3. Спектры оптического поглощения $\alpha(\lambda)$ подложки ГГГ (1) и толстой пленки $(\text{Tb,La,Gd})_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ № II-6 (2) при 300 К. Нумерация пленок соответствует табл. 2.

Tb^{3+} [13,14]. Интенсивность этой полосы поглощения возрастает с ростом концентрации оксида тербия в растворе-расплаве, а следовательно, и в пленке. Полоса поглощения с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.280 \mu\text{m}$, интенсивность которой падает с ростом концентрации оксида тербия, обусловлена электронным переходом $1S_0 \rightarrow 3P_1$ примесных ионов Pb^{2+} [6,7]. Полоса поглощения с максимумом в интервале $0.335\text{--}0.345 \mu\text{m}$, которая наблюдается и в подложке из ГГГ и связывается с созданием кислородных вакансий, компенсирующих заряд двухвалентных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , вводимых в ГГГ для снижения количества дислокаций, соответствует поглощению комплексных центров окраски [20].

В спектрах поглощения исследуемых пленок в диапазоне от 6000 до 1000 cm^{-1} ($1.7\text{--}10 \mu\text{m}$) наблюдаются узкие малоинтенсивные полосы поглощения $4f \rightarrow 4f$ -переходов иона Tb^{3+} с основного уровня $7F_6$ на уровни мультиплетов $7F_0$ ($5666, 5593, 5458 \text{ cm}^{-1}$), $7F_1$ ($5406, 5207, 5129, 4987, 4909 \text{ cm}^{-1}$), $7F_2$ ($4826, 4763, 4665, 4553 \text{ cm}^{-1}$), $7F_3$ ($4518, 4480, 4405, 4348, 4268, 4231 \text{ cm}^{-1}$), $7F_4$ ($3631, 3559, 3527, 3487, 3454, 3335, 3278, 3244 \text{ cm}^{-1}$), $7F_5$ ($2503, 2411, 2324, 2294, 2281, 2130, 2089, 2045, 2005 \text{ cm}^{-1}$) (рис. 3).

На рис. 4 и 5 показаны спектры люминесценции при возбуждении СИ в образце № I-2, при температурах 10 и 300 К. При $T = 10 \text{ K}$ люминесценция возбуждалась на длине волны $\lambda = 0.080 \mu\text{m}$, а при $T = 300 \text{ K}$ — на длинах волн $\lambda = 0.085$ и $0.220 \mu\text{m}$. Из этих рисунков

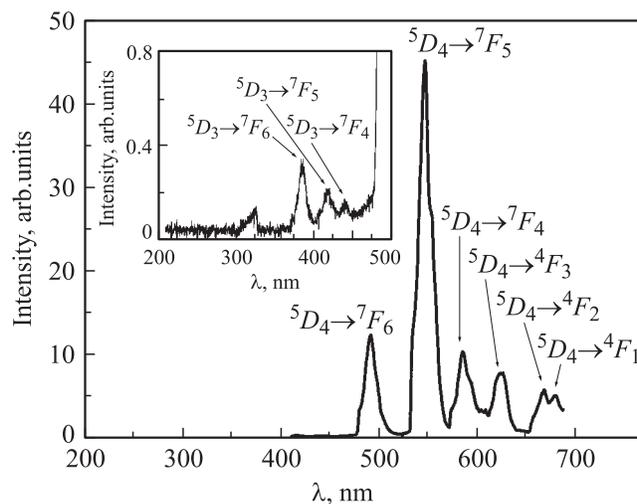


Рис. 4. Спектры люминесценции эпитаксиальной пленки № I-2 при возбуждении СИ с длиной волны $\lambda = 0.080 \mu\text{m}$ при $T = 10 \text{ K}$. На вставке показан спектр люминесценции той же пленки в области от 0.200 до $0.500 \mu\text{m}$.

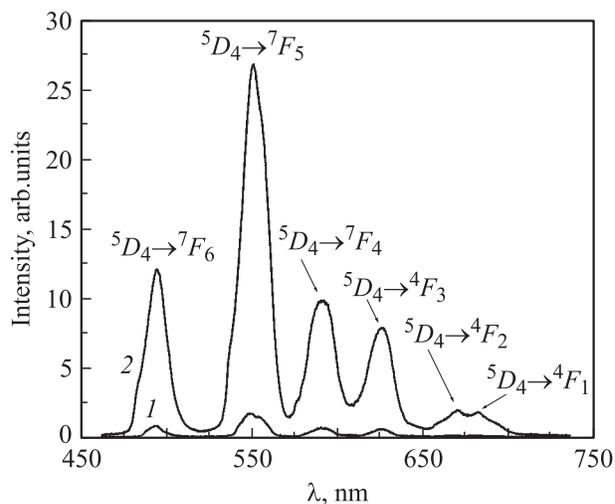


Рис. 5. Спектры люминесценции эпитаксиальной пленки № I-2 при возбуждении СИ с длинами волн $\lambda = 0.220$ (1) и $0.085 \mu\text{m}$ (2) при $T = 300 \text{ K}$.

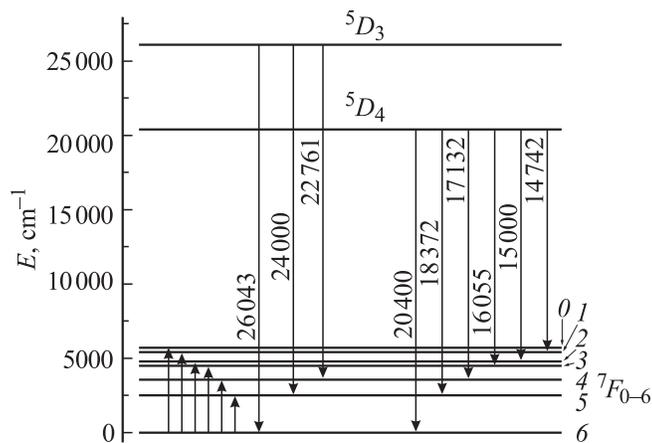


Рис. 6. Схема энергетических уровней ионов Tb^{3+} в эпитаксиальной пленке $(Tb,Gd)_3Ga_5O_{12}$ (образец № I-2) при 300 К (поглощение) и 10 К (люминесценция).

видно, что наиболее интенсивной является полоса люминесценции с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.544 \mu m$, соответствующая излучательному переходу ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$. Достаточно интенсивными являются также полосы люминесценции с максимумами на длинах волн $\lambda \approx 0.490$, 0.583 и $0.623 \mu m$. Аналогичная структура спектра люминесценции наблюдалась в работах [21,22] при исследовании Tb-содержащих кварцевых гель-стекол при возбуждении на длине волны $\lambda_{exc} = 0.200 \mu m$ при 298 К и алюмооборатных стекол при возбуждении на длине волны $\lambda_{exc} = 0.254 \mu m$ при 300 К.

Поскольку в спектрах поглощения эпитаксиальных пленок мультиплеты 5D_3 и 5D_4 иона Tb^{3+} при 300 К не разрешаются, схема энергетических уровней этого иона построена на основе полос поглощения (рис. 3) и люминесценции (рис. 4). Эта схема представлена на рис. 6.

5. Заключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что из Pb-содержащего раствора-расплава на подложках ГГГ с ориентацией (111) методом ЖФЭ можно выращивать пленки ГГГ, легированные тербием. Обнаруженная в этих пленках широкая интенсивная полоса поглощения с максимумом на длине волны $0.260 \mu m$, интенсивность которой возрастает с ростом концентрации оксида тербия в пленке, соответствует разрешенному электрическому дипольному переходу между электронными конфигурациями $4f^8({}^7F_6) \rightarrow 4f^7({}^8S)5d({}^7D)$ ионов Tb^{3+} . Полоса поглощения с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.280 \mu m$, интенсивность которой падает с ростом концентрации оксида тербия, обусловлена электронным переходом ${}^1S_0 \rightarrow {}^3P_1$ примесных ионов Pb^{2+} . Узкие малоинтенсивные полосы поглощения в диапазоне от 6000 до 1000 cm^{-1} соответствуют $4f \rightarrow 4f$ -переходам иона Tb^{3+} с основного уровня 7F_6 на уровни мультиплетов 7F_0 , 7F_1 , 7F_2 , 7F_3 , 7F_4 , 7F_5 . Показано, что наиболее ин-

тенсивной среди полос люминесценции является полоса с максимумом на длине волны $\lambda \approx 0.544 \mu m$, соответствующая излучательному переходу ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ ионов Tb^{3+} . На основе спектров поглощения и люминесценции построена схема энергетических уровней иона Tb^{3+} в эпитаксиальных пленках ГГГ, легированных тербием.

Авторы благодарят Г. Циммерера за предоставление возможности измерений на установке Superlumi, Г. Стриганюка за помощь в измерениях, М.Е. Дорошенко и В.Ф. Лебедева за обсуждение результатов работы.

Список литературы

- [1] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, Н.Н. Сысоев. *Научно-технические технологии* **5**, 44 (2004).
- [2] Ю.В. Зоренко, И.В. Констанкевич, В.В. Михайлин, В.Н. Колобанов, Д.А. Спасский. *Опт. и спектр.* **96**, 436 (2004).
- [3] J.M. Robertson, M.W. van Tol. *Thin Solid Films* **114**, 221 (1984).
- [4] Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах. Справочник / Под ред. Н.Н. Евтихиева, Б.Н. Наумова. Радио и связь, М. (1987). 488 с.
- [5] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. *Прикладная магнитооптика*. Энергоатомиздат, М. (1990). 320 с.
- [6] G.V. Scott, J.L. Page. *J. Appl. Phys.* **48**, 1342 (1977).
- [7] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, А.В. Васильев, В.Г. Плотноченко, С.В. Лавришев, А.М. Салецкий, К.В. Сташун, Н.Н. Сысоев, А.Н. Чуркин. *ФТТ* **43**, 1594 (2001).
- [8] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, А.В. Васильев, В.Г. Плотноченко, Ю.Н. Пырков, А.М. Салецкий, К.В. Сташун, Н.Н. Сысоев. *Неорган. материалы* **40**, 1 (2004).
- [9] J.A. Koningstein. *Phys. Rev.* **136**, A 717 (1964).
- [10] M.A. Bunuel, L. Lozano, J.P. Chaminade, V. Moine, B. Jacquier. *Opt. Mater.* **13**, 211 (1999).
- [11] В.И. Арбузов, В.Я. Грабовскис, Н.С. Ковалева, Н.Т. Рогунис, М.Н. Толстой. *Опт. и спектр.* **65**, 943 (1988).
- [12] M.F. Churbanov, I.V. Scripachev, V.S. Shiryayev, V.G. Plotnichenko, S.V. Smetanin, E.B. Kryukova, Yu.N. Pyrkov, V.I. Galagan. *J. Non-Cryst. Sol.* **326 & 327**, 301 (2003).
- [13] E. Sarantopoulou, Z. Kollia, A.C. Cefalas, V.V. Semashko, R.Yu. Abdulsabirov, A.K. Naumov, S.L. Korableva. *Opt. Commun.* **156**, 101 (1998).
- [14] H. Eberdorff-Heidepriem, D. Ehrh. *J. Non-Cryst. Sol.* **248**, 247 (1999).
- [15] K.S. Thomas, S. Singh, G.H. Dicke. *J. Chem. Phys.* **38**, 2180 (1963).
- [16] J. Qiu, M. Shojiya, R. Kanno, Y. Kawamoto. *Opt. Mater.* **13**, 319 (1999).
- [17] R. Bayerer, J. Heber, D. Mateika. *Z. Phys. B: Cond. Matter.* **64**, 201 (1986).
- [18] А.К. Звездин, В.М. Матвеев, А.А. Мухин, А.И. Попов. *Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах*. Наука, М. (1985). 296 с.
- [19] А.С. Яценко. *Наука, Новосибирск* (2001). 200 с.
- [20] A. Matkovskii, D. Sugak, S. Melnyk, P. Potera, A. Suchocki, Z. Frukacz. *J. Alloys. Comp.* **300–301**, 395 (2000).
- [21] Г.Е. Малашкевич, Г.И. Семкова, А.П. Ступак, А.В. Суходолов. *ФТТ* **46**, 1386 (2004).
- [22] D.M. Krol, R.P. van Staple, J.H. Haanstra, T.J.A. Popma, G.E. Thomas, A.T. Vink. *J. Lumin.* **37**, 293 (1987).