

Оптическое поглощение в кобальтсодержащих эпитаксиальных монокристаллических пленках гадолиний-галлиевого граната

© В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева*, В.Г. Плотниченко**, Ю.Н. Пырков**, А.М. Салецкий***, Н.Н. Сысоев***, А.М. Галкин***, В.Н. Дудоров

Совместная хозрасчетная лаборатория „Магнитооптоэлектроника“ Института общей физики Российской академии наук при Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева, 430000 Саранск, Россия

* Институт общей физики Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

** Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

*** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

E-mail: antonv@aha.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 10 июня 2002 г.)

Методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденных растворов-расплавов на основе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ и $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ выращены Co-содержащие монокристаллические гранатовые пленки. Показано, что кобальт находится в пленках в трехвалентном состоянии. При введении в исходный раствор-расплав GeO_2 кобальт переходит в двухвалентное состояние. Показано, что спектр поглощения выращенных пленок содержит две широкие полосы поглощения в диапазоне длин волн 450–800 нм и 900–1800 нм, каждая из которых содержит по три компонента. Определено спин-орбитальное расщепление этих полос.

Валентностью кристаллообразующих ионов в монокристаллических пленках гранатов, синтезируемых методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденного раствора-расплава, можно управлять, вводя в раствор-расплав различные добавки (см., например, [1]). В частности, валентность ионов кобальта в эпитаксиальных монокристаллических пленках граната изменяется при введении в раствор-расплав GeO_2 [2]. Заметим, что Co-содержащие монокристаллы перспективны для использования в качестве насыщающихся фильтров в лазерах инфракрасного (ИК) диапазона [3]. Это обусловлено наличием в их спектрах пропускания широкой полосы поглощения в диапазоне длин волн $\lambda = 1.3\text{--}1.6\ \mu\text{m}$.

Цель настоящей работы состоит в изучении возможности изменения валентности ионов кобальта в эпитаксиальных монокристаллических пленках граната и исследовании оптического поглощения в них в диапазоне длин волн от 0.2 до 2.5 μm .

Эта статья является продолжением работы [2], в которой сообщается об обнаружении оптического поглощения двух- и трехвалентных ионов кобальта в монокристаллических пленках гадолиний-галлиевого граната, выращенных методом жидкофазной эпитаксии из переохлажденных растворов-расплавов на основе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ и $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$.

1. Рост пленок

Кобальт-содержащие пленки выращивались на подложках $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG) с ориентацией (111) из растворов-расплавов на основе $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ (I), $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ (II), $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ (III)

и $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$ (IV) из платинового тигля. В отсутствие GeO_2 в растворе-расплаве для обеспечения зарядовой компенсации кобальт в основном находится в трехвалентном состоянии [1]. Лишь небольшое количество ионов Co^{2+} может образовываться для компенсации заряда примесных ионов Pb^{4+} и Pt^{4+} , входящих в пленку из раствора-расплава. Платина входит в раствор-расплав вследствие растворения материала тигля. При введении в расплав GeO_2 ионы кобальта должны переходить в двухвалентное состояние для компенсации заряда ионов Ge^{4+} , входящих в основном в тетраэдрическую подрешетку структуры граната.

Состав растворов-расплавов I–IV характеризовался следующими мольными отношениями.

Для I

$$R_1 = (\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Co}_3\text{O}_4)/\text{Gd}_2\text{O}_3,$$

$$R_2 = \text{PbO}/\text{B}_2\text{O}_3,$$

$$R_3 = (\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Co}_3\text{O}_4)/(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Co}_3\text{O}_4 + \text{PbO} + \text{B}_2\text{O}_3),$$

$$R_4 = \text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Co}_3\text{O}_4.$$

Для II

$$R_1 = (\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4)/\text{Gd}_2\text{O}_3,$$

$$R_2 = \text{PbO}/\text{B}_2\text{O}_3,$$

$$R_3 = (\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4)/(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4 + \text{PbO} + \text{B}_2\text{O}_3),$$

$$R_4 = (\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2)/\text{Co}_3\text{O}_4.$$

Для III

$$R_1 = (\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Co}_3\text{O}_4)/\text{Gd}_2\text{O}_3,$$

$$R'_2 = \text{Bi}_2\text{O}_3/\text{B}_2\text{O}_3,$$

$$R'_3 = (\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Co}_3\text{O}_4)/(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{Co}_3\text{O}_4 + \text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3),$$

$$R_4 = \text{Ga}_2\text{O}_3/\text{Co}_3\text{O}_4.$$

Для IV

$$R_1 = (\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4)/\text{Gd}_2\text{O}_3,$$

$$R'_2 = \text{Bi}_2\text{O}_3/\text{B}_2\text{O}_3,$$

$$R'_3 = (\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4)/(\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2 + \text{Co}_3\text{O}_4 + \text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{B}_2\text{O}_3),$$

$$R_4 = (\text{Ga}_2\text{O}_3 + \text{GeO}_2)/\text{Co}_3\text{O}_4.$$

Пленки, выращенные из растворов-расплавов I–IV, были окрашены соответственно в желтовато-зеленый, зеленовато-голубой, зеленый и синий цвета. Мольные отношения растворов-расплавов, которые использовались при выращивании эпитаксиальных пленок, приведены в табл. 1. Здесь же для сравнения представлены моль-

Таблица 1. Мольные отношения компонентов в растворах-расплавах

Раствор-расплав	R_1	R_2	R'_2	R_3	R'_3	R_4
I	14.42	16.03	–	0.08	–	9.00
II	30.77	16.03	–	0.15	–	20.35
III	1.11	–	15.92	–	0.14	9.00
IV	2.34	–	15.92	–	0.20	20.14
V	14.42	16.03	–	0.08	–	–
VI	1.11	–	15.92	–	0.14	–

ные отношения растворов-расплавов PbO–B₂O₃ (V) [4] и Bi₂O₃–B₂O₃ (VI) [5], из которых выращивались пленки номинального состава Gd₃Ga₅O₁₂.

2. Эксперимент

Суммарную толщину $2h$ пленок на обеих сторонах подложки определяли, взвешивая подложку до эпитаксиального роста и после него [4–6]. Различием плотности выращенных пленок и подложки пренебрегали.

Спектры пропускания пленок измерялись в диапазоне длин волн 0.2–2.5 μm с помощью спектрофотометра Lambda 900 фирмы Perkin-Elmer при комнатной температуре. Спектры поглощения пленок рассчитывали из спектров пропускания подложек с выращенными на

Таблица 2. Параметры роста эпитаксиальных пленок гранатов

Номер образца	$T_g, ^\circ\text{C}$	t_g, min	$2h, \mu\text{m}$	$f_g, \mu\text{m}/\text{min}$
I-1	985	5	5.8	0.58
I-2	956	5	10.3	1.03
I-3	931	5	6.2	0.63
I-4	904	5	4.3	0.43
I-5	877	5	2.3	0.23
I-6	937	60	92.3	0.77
II-1	906	5	1.98	0.20
II-2	889	5	2.6	0.26
II-3	859	5	3.3	0.33
II-4	822	5	2.3	0.23
II-5	874	120	44.6	0.19
III-1	1015	5	22.2	2.2
III-2	996	5	23.8	2.4
III-3	977	5	22.6	2.3
III-4	960	5	17.7	1.8
III-5	943	5	14.5	1.4
III-6	952	5	70.8	7.1
III-7	931	5	35.1	3.5
III-8	914	5	27.8	2.8
III-9	1003	15	29.3	0.98
III-10	952	15	87.5	2.9
IV-1	990	5	1.3	0.13
IV-2	963	5	9.1	0.91
IV-3	937	5	13.8	1.37
IV-4	953	15	27.6	0.92
IV-5	948	40	59.4	0.74
V-1	1017	10	28.4	1.42
V-2	1005	13	43.4	1.67
V-3	987	10	30.5	1.52
V-4	971	11	20.8	0.95
VI-1	925	15	16.2	0.54
VI-2	912	15	22.8	0.76
VI-3	902	15	32.8	1.1

них пленками, вычитая поглощение подложки. Параметры роста пленок приведены в табл. 2, где T_g, t_g, f_g и $2h$ — температура, время, скорость роста и толщина пленок соответственно. Римские цифры относятся к раствору-расплаву, арабские — к номеру пленок, последовательно выращенных из соответствующего раствора-расплава. Отметим, что для образца III-6, выращенного сразу после гомогенизации раствора-расплава, скорость роста пленки оказалась максимальной и составила 7.1 μm/min.

3. Результаты измерений и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры поглощения подложки GGG (кривая 0) и пленок, выращенных из растворов-расплавов I, III, V и VI (кривые 1–4 соответственно), которые позволяют разделить пики по-

Таблица 3. Положение максимумов полос поглощения и их интерпретация в спектрах пропускания Со-содержащих пленок и кристаллов

Раствор-расплав	Диапазон полос поглощения	Максимумы оптических полос	Спин-орбитальное расщепление полос	Электронный переход [8]
PbO-B ₂ O ₃ (I)	540–800 nm (18 500–12 500 cm ⁻¹)	570, 625, 680 nm (17 500, 16 000, 14 700 cm ⁻¹)	2800 cm ⁻¹	625 nm (⁵ E → ⁵ T ₂) Додекаэдр. Co ³⁺ 680 nm (¹ A ₁ → ¹ T ₁) Октаэдр. Co ³⁺
	900–1700 nm (11 100–5900 cm ⁻¹) 390 nm (25 600 cm ⁻¹) 280 nm (35 600 cm ⁻¹)	1100, 1265, 1630 nm (9100, 7900, 6130 cm ⁻¹)	2970 cm ⁻¹	1100 nm (⁵ E → ⁵ T ₂) Тетраэдр. Co ³⁺ 390 nm (¹ A ₁ → ¹ T ₂) Октаэдр. Co ³⁺ 280 nm (¹ S ₀ → ³ P ₁) Pb ²⁺ (6s ²)
	500–770 nm (20 000–13 000 cm ⁻¹) 1060–1760 nm (9400–5700 cm ⁻¹) 280 nm (35 600 cm ⁻¹)	573, 613, 657 nm (17 500, 16 300, 15 200 cm ⁻¹) 1295, 1425, 1625 nm (7720, 7020, 6150 cm ⁻¹)	2300 cm ⁻¹ 1570 cm ⁻¹	613 nm (⁴ A ₂ → ⁴ T ₁ (⁴ P)) Тетраэдр. Co ²⁺ 1425 nm (⁴ A ₂ → ⁴ T ₁ (⁴ F)) Тетраэдр. Co ²⁺ 280 (¹ S ₀ → ³ P ₁) Pb ²⁺ (6s ²)
Bi ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ (III)	520–740 nm (19 200–13 500 cm ⁻¹) 900–1700 nm (11 100–5900 cm ⁻¹) 400 nm (25 000 cm ⁻¹) 290 nm (34 500 cm ⁻¹)	575, 613, 651 nm (17 400, 16 300, 15 360 cm ⁻¹) 1100, 1290, 1630 nm (9100, 7750, 6130 cm ⁻¹)	2040 cm ⁻¹ 2970 cm ⁻¹	613 nm (⁴ A ₂ → ⁴ T ₁ (P)) Тетраэдр. Co ²⁺ 1100 nm (⁵ E → ⁵ T ₂) Тетраэдр. Co ³⁺ 400 nm (¹ A ₁ → ¹ T ₂) Октаэдр. Co ³⁺ 290 nm (¹ S ₀ → ³ P ₁) Bi ³⁺ (6s ²)
	450–741 nm (22 200–13 500 cm ⁻¹) 1100–1800 nm (9100–5560 cm ⁻¹) 290 nm (34 500 cm ⁻¹)	573, 613, 657 nm (17 500, 16 300, 15 200 cm ⁻¹) 1295, 1425, 1625 nm (7720, 7020, 6150 cm ⁻¹)	2300 cm ⁻¹ 1570 cm ⁻¹	613 nm (⁴ A ₂ → ⁴ T ₁ (P)) Тетраэдр. Co ²⁺ 1425 nm (⁴ A ₂ → ⁴ T ₁ (F)) Тетраэдр. Co ²⁺ 290 nm (¹ S ₀ → ³ P ₁) Bi ³⁺ (6s ²)
	Кристалл шпинели MgAl ₂ O ₄ : Co ²⁺ (4 · 10 ¹⁹ ion/cm ³)	490–680 nm (20 400–14 700 cm ⁻¹) 1050–1660 nm (9500–6000 cm ⁻¹)	549, 583, 624 nm (18 210, 17 150, 16 030 cm ⁻¹) 1230, 1340, 1520 nm (8100, 7460, 6580 cm ⁻¹)	2180 cm ⁻¹ 1520 cm ⁻¹
Кварцевое стекло: Co ²⁺ [9]		19 700, 16 500, 14 500 cm ⁻¹ 8000, 6300, 5300 cm ⁻¹	5200 cm ⁻¹ 2700 cm ⁻¹	
	Кристаллический кварц: Co ²⁺ [9]	18 500, 17 100, 15 600 cm ⁻¹ 7700, 6700, 5700 cm ⁻¹	2900 cm ⁻¹ 2000 cm ⁻¹	

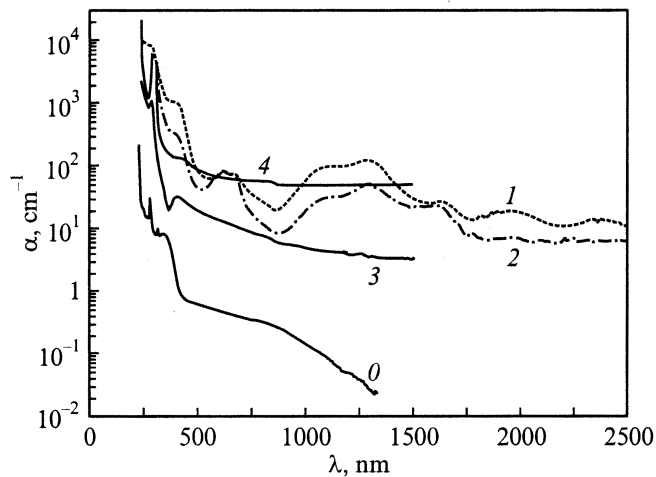


Рис. 1. Спектры поглощения образцов I-1 (1), III-3 (2), V-3 (3), VI-2 (4) и подложки GGG (0). Номера образцов соответствуют табл. 2.

глошения, обусловленные примесными и легирующими ионами. Из сравнения кривых 0, 1 и 3 следует, что пик поглощения с максимумом на длине волны 280 nm связан с примесными ионами Pb^{2+} ($6s^2$), что согласуется с результатами работы [7], в которой данный пик был отождествлен с электронным переходом $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$.

Исходя из выводов работы [8], с легирующими ионами Co^{3+} в пленках, выращенных из раствора-расплава I, можно связать две широкие полосы поглощения в диапазонах спектра приблизительно 540–800 nm и 900–1700 nm и узкую полосу поглощения с максимумом около 390 nm (табл. 3).

Каждая из широких полос состоит из трех компонент с максимумами: первая — около 570, 625 и 680 nm, вторая — около 1100, 1265 и 1630 nm.

Из сравнения кривых 0, 2 и 4 (рис. 1) следует, что пик поглощения с центром на длине волны ≈ 290 nm связан с примесными ионами Bi^{3+} ($6s^2$) (электронный переход $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ [1]).

С легирующими ионами Co^{3+} в пленках, выращенных из раствора-расплава III, связаны широкая полоса поглощения в диапазоне приблизительно 900–1700 nm и узкая полоса поглощения с максимумом около 400 nm. Вторая широкая полоса поглощения в диапазоне длин волн 520–740 nm обусловлена электронным переходом $^4A_2 \rightarrow ^4T_1(^4P)$ тетраэдрического Co^{2+} [8]. В пленках, выращенных из раствора-расплава III, компенсация заряда обеспечивается примесными ионами Pt^{4+} .

Для пленок, выращенных из раствора-расплава III, каждая из двух широких полос (900–1700 nm для Co^{3+} ; 520–740 nm для Co^{2+}) также содержит три компоненты, параметры которых приведены в табл. 3.

Основываясь на результатах работы [8], пик поглощения с центром около 1100 nm можно связать с электронным переходом $^5E \rightarrow ^5T_2$ ионов Co^{3+} , входящих в тетраэдрическую подрешетку структуры граната; пи-

ки поглощения с центрами на 680 и 390 nm следует отнести соответственно к электронным переходам $^1A \rightarrow ^1T_1$ и $^1A_1 \rightarrow ^1T_2$ ионов Co^{3+} , входящих в октаэдрическую подрешетку, а пик поглощения с центром около 625 nm — к электронному переходу $^5E \rightarrow ^5T_2$ ионов Co^{3+} , входящих в додекаэдрическую подрешетку (табл. 3).

Из сравнения кривых 1 и 2 (рис. 1) видно, что спектр поглощения пленки, выращенной из раствора-расплава I, в диапазоне длин волн от 0.7 до 1.5 μm лежит выше спектра поглощения пленки, выращенной из раствора-расплава III. Следовательно, можно оптимизировать параметры роста для получения пленок с заданным оптическим поглощением.

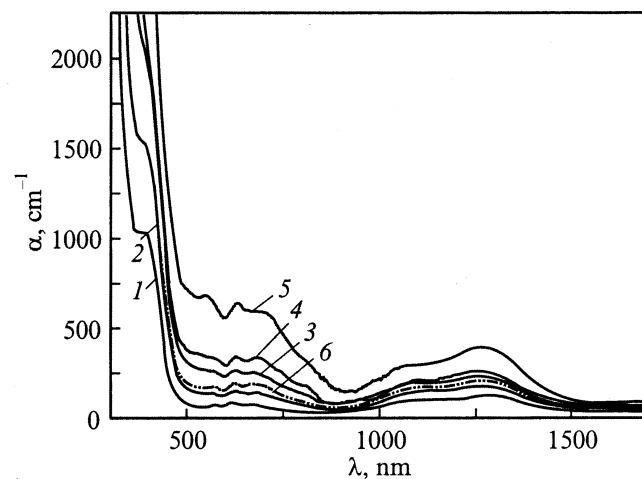


Рис. 2. Спектры поглощения образцов I-1 (1), I-2 (2), I-3 (3), I-4 (4), I-5 (5) и I-6 (6). Номера образцов соответствуют табл. 2.

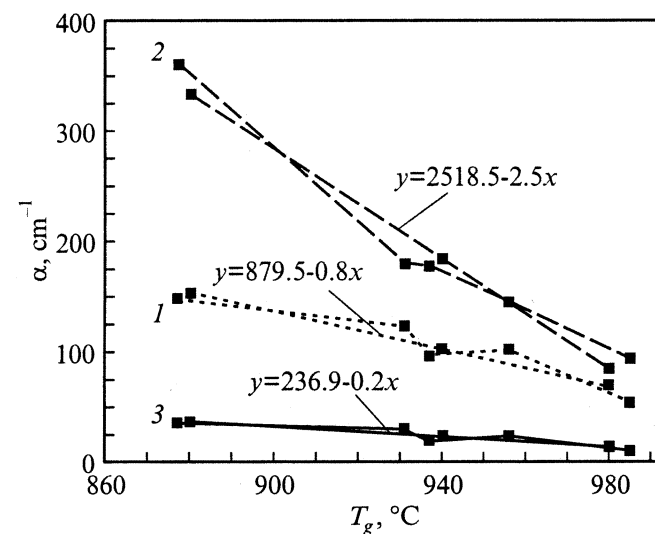


Рис. 3. Зависимости коэффициента поглощения α пленок, выращенных из раствора-расплава I, на длинах волн $\lambda = 1071$ (1), 1265 (2) и 1630 nm (3) от температуры роста T_g .

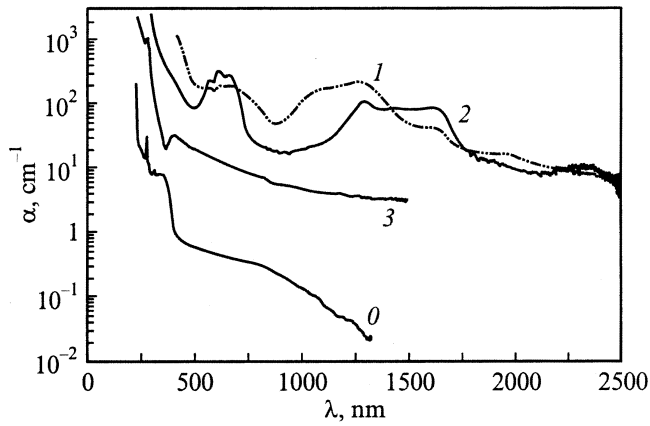


Рис. 4. Спектры поглощения образцов I-6 (1), II-5 (2), V-3 (3) и подложки GGG (0). Номера образцов соответствуют табл. 2.

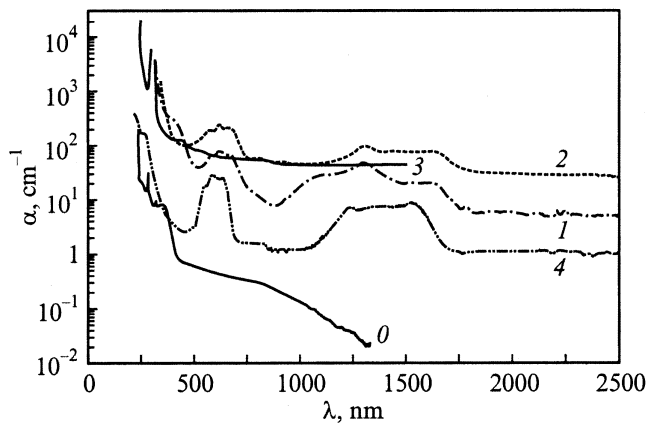


Рис. 5. Спектры поглощения подложки GGG (0), образцов III-3 (1), IV-5 (2), VI-2 (3) и шпинели $MgAl_2O_4$, легированной ионами Co^{2+} (4). Номера образцов соответствуют табл. 2.

На рис. 2 приведены спектры поглощения пленок, выращенных из раствора-расплава I при разных температурах (см. табл. 2). Видно, что по мере снижения температуры роста коэффициент оптического поглощения α во всем диапазоне измерений растет. Это коррелирует с ростом коэффициента распределения кобальта (который меньше единицы) при увеличении переохлаждения раствора-расплава. Зависимости α от T_g для характерных пиков поглощения ионов Co^{3+} показаны на рис. 3. Видно, что они близки к линейным и могут быть описаны линейными функциями, приведенными на рисунке. Следовательно, полученные зависимости позволяют определить температуры роста для выращивания пленок с необходимым поглощением.

На рис. 4 приведены спектры поглощения пленок, выращенных из растворов-расплавов I, II, V (кривые 1–3 соответственно), и подложки GGG (кривая 0). Видно, что при введении в раствор-расплавы GeO_2 обе широкие полосы поглощения еще более уширились, а слабая полоса поглощения, связанная с ионами Co^{3+}

($\lambda = 390$ nm), входящими в октаэдрическую подрешетку, исчезла. Исходя из этого можно сделать вывод, что кобальт перешел в двухвалентное состояние. Положение максимумов первого триплета, который расширился в коротковолновую область спектра, заняв диапазон около 500–770 nm, и максимумов второго триплета, сдвинувшегося в длинноволновую область спектра (1060–1760 nm), приведены в табл. 3.

На рис. 5 показаны спектры поглощения подложки GGG (кривая 0) и пленок, выращенных из растворов-расплавов III, IV, VI (кривые 1–3 соответственно), а также спектр поглощения шпинели $MgAl_2O_4$, легированной ионами Co^{2+} (кривая 4). Видно, что при введении GeO_2 в раствор-расплавы первый триплет сдвинулся в коротковолновую область спектра 450–741 nm, а второй триплет расширился в длинноволновую часть спектра 1100–1800 nm. Основываясь на результатах работы [8], пики поглощения с максимумами около 613 и 1425 nm мы связали с электронными переходами ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1 ({}^4P)$ и ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T_1 ({}^4F)$ ионов Co^{2+} , входящих в тетраэдрическую подрешетку структуры граната.

Спектр поглощения шпинели $MgAl_2O_4$, легированной ионами Co^{2+} , содержит две полосы поглощения в диапазонах 490–680 nm и 1050–1660 nm. Каждая из этих двух полос поглощения также испытывает расщепление на три компоненты (табл. 3). Видно, что у эпитаксиальных пленок полосы поглощения ионов Co^{2+} шире, чем у монокристаллической шпинели.

Спин-орбитальное расщепление уровней для пленок, выращенных из растворов-расплавов II и IV, одинаково и составляет 2300 и 1570 cm^{-1} . Для пленок, выращенных из раствора-расплава I, эти величины составляют 2970 и 2800 cm^{-1} . Для пленок, выращенных из раствора-расплава III, они имеют значения 2970 и 2040 cm^{-1} , а для шпинели, легированной ионами Co^{2+} , равны 2180 и 1520 cm^{-1} . Отметим, что, согласно [9], это расщепление для кварцевого стекла, легированного ионами Co^{2+} , составляет 5200 и 2700 cm^{-1} , а для кристаллического кварца, легированного ионами Co^{2+} , — 2900 и 2000 cm^{-1} .

Таким образом, в настоящей работе впервые методом жидкофазной эпитаксии из растворов-расплавов на основе $PbO-B_2O_3$, $Bi_2O_3-B_2O_3$ выращены эпитаксиальные кобальт-содержащие гранатовые пленки составов $Gd_3Ga_5O_{12} : Co^{3+}$ и $Gd_3(Ga,Ge)_5O_{12} : Co^{2+}$.

Получены следующие результаты.

1) Введение в раствор-расплавы GeO_2 приводит к тому, что кобальт в выращенных пленках находится в двухвалентном состоянии и занимает тетраэдрическую подрешетку структуры граната.

2) В спектрах поглощения эпитаксиальных пленок, содержащих двух- и трехвалентные ионы кобальта, имеются две широкие полосы поглощения в ближней ИК-области спектра, причем каждая из полос содержит три компоненты.

3) В выращенных эпитаксиальных пленках полосы поглощения тетраэдрических ионов Co^{2+} шире, чем у монокристаллической шпинели.

Авторы благодарят А.В. Васильева, М.И. Беловолова и В.А. Михайлова за помощь в проведении настоящей работы и обсуждение ее результатов.

Список литературы

- [1] В.В. Рандошкин, А.Я. Червоненкис. Прикладная магнитооптика. Энергоатомизда, М. (1990). 320 с.
- [2] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, В.Г. Плотниченко, Ю.Н. Пырков. Письма в ЖТФ **26**, 23, 55 (2000).
- [3] Б.И. Галаган, Е.А. Годовикова, Б.И. Денкер, М.Л. Мейльман, В.В. Осико, С.Е. Сверчков. Квантовая электрон. **26**, 3, 189 (1999).
- [4] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, А.В. Васильев, В.Г. Плотниченко, С.В. Лаврищев, А.М. Салецкий, К.В. Сташун, Н.Н. Сысоев, А.Н. Чуркин. ФТГ **43**, 9, 1594 (2001).
- [5] В.В. Рандошкин, Н.В. Васильева, В.Г. Плотниченко, А.М. Салецкий, К.В. Сташун, Н.Н. Сысоев. Письма в ЖТФ **26**, 10, 22 (2000).
- [6] В.В. Рандошкин, А.М. Беловолов, М.И. Беловолов, Н.В. Васильева, Е.М. Дианов, К.В. Сташун, М.И. Тимошечкин. Квантовая электрон. **25**, 3, 233 (1998).
- [7] G.V. Scott, J.L. Page. J. Appl. Phys. **48**, 3, 1342 (1977).
- [8] D.L. Wood, J.P. Remeika. J. Chem. Phys. **46**, 9, 3595 (1967).
- [9] М.А. Ельяшевич. Спектры редких земель. М. (1953). 456 с.