

# Спектрально-люминесцентные свойства сильнолегированных хромом монокристаллов форстерита. II. Люминесценция

В.Ф.Лебедев\*, А.В.Гайстер\*\*, С.Ю.Теняков\*, Е.М.Дианов\*, Е.В.Жариков\*\*

*Исследованы поляризованные спектры люминесценции монокристаллов форстерита с весовым содержанием хрома в расплаве 0.015–0.97%. Большинство кристаллов выращивалось методом Чохральского в стандартных окислительных условиях (при объемном содержании кислорода 1.4–2.4%). Были также выращены кристаллы в атмосфере с повышенным объемным содержанием кислорода (~12%) и в нейтральной атмосфере (100% Ar). Во всем диапазоне легирования кристаллов отсутствовало тушение люминесценции ионов  $Cr^{4+}$ , возбуждаемой как в  ${}^3T_2$  ( $\lambda_{ex} \sim 980$  нм), так и в  ${}^3T_1$  ( $\lambda_{ex} \sim 632.8$  нм) энергетические уровни. В кристаллах, поглощающих свыше 70% энергии лазерного излучения, начинает проявляться перепоглощение люминесценции ионов  $Cr^{4+}$  собственными полосами поглощения. Перепоглощение люминесценции ионов  $Cr^{3+}(2)$  в позициях структуры форстерита с зеркальной симметрией сильнее из-за большего ее перекрытия полосами поглощения ионов  $Cr^{4+}$ . Обнаружено, что люминесценция ионов  $Cr^{4+}$  поляризована преимущественно вдоль оси **b** при любой поляризации возбуждающего излучения. Широкополосная люминесценция ионов  $Cr^{3+}(2)$  поляризована преимущественно вдоль оси **c** для всех исследованных кристаллов, вне зависимости от поляризации возбуждающего излучения и концентрации кислорода в атмосфере ростовой камеры. Люминесценция ионов  $Cr^{3+}(2)$ , поляризованная вдоль оси **c**, имеет максимум при  $\lambda \sim 900$  нм, вдоль оси **b** – при  $\lambda \sim 860$  нм и вдоль оси **a** – при  $\lambda \sim 850$  нм.*

**Ключевые слова:** монокристаллы форстерита, хром, люминесценция, перепоглощение люминесценции, поляризация люминесценции.

## 1. Введение

К настоящему времени опубликован ряд работ по исследованию люминесцентных свойств кристаллов форстерита со «стандартным» весовым содержанием хрома 0.01%–0.02% [1–14], и среди них – исследования эффективности лазеров на отдельных кристаллах форстерита с более высоким содержанием хрома [4, 8–10].

Вместе с тем данные о люминесцентных свойствах кристаллов, приводимые в упомянутых работах, отличаются неполнотой, а иногда и противоречивостью. Например, сравнение измеренных интенсивностей люминесценции  $Cr^{3+}(2)$  (центров  $Cr^{3+}$  в позициях M2 структуры форстерита с зеркальной симметрией) и  $Cr^{4+}$  для двух кристаллов со значительным различием в концентрациях хрома позволяет утверждать, что с ростом содержания хрома в кристалле отношение концентраций  $Cr^{4+}/Cr^{3+}$  увеличивается [8]. Анализ спектров поглощения этой серии кристаллов приводит к противоположному выводу [2, 11, 14, 15]. Отличаются неполнотой приводимые в упомянутых выше исследованиях данные о поляризации люминесценции как для ионов  $Cr^{4+}$ , так и для ионов  $Cr^{3+}$ . Отмечена только «полная» поляризация люминесценции ионов  $Cr^{4+}$  вдоль оси **b** [12, 13]. (Здесь и далее все кристаллографические данные приводятся в установке  $Pbnm$ ). Противоречивы также данные о положении по-

лосы люминесценции  $Cr^{3+}(2)$  для кристаллов, выращенных в одной лаборатории ( $\lambda_{max} \sim 870, 900, 920, 970$  нм) [8, 9, 15]. Исследование кристаллов, отличающихся широким диапазоном уровня легирования, показывает, что заметного уменьшения интенсивности люминесценции ионов  $Cr^{3+}(2)$  не происходит, несмотря на сильное ее перекрытие полосами поглощения ионов  $Cr^{4+}$  [6].

Цель настоящей работы – систематическое исследование поляризованных спектров люминесценции кристаллов форстерита при монотонном увеличении содержания хрома во всем диапазоне, реализуемом при выращивании кристаллов методом Чохральского.

## 2. Эксперимент

Условия роста и характеристики исследуемых монокристаллических образцов описаны в табл.1 из работы [15]. При записи спектров люминесценции направления возбуждения и наблюдения совпадали. Это позволило выявить влияние перекрытия полос поглощения и люминесценции на интенсивность и форму люминесценции ионов как  $Cr^{3+}$ , так и  $Cr^{4+}$ . Особенно отчетливо это влияние проявилось при сравнении спектров люминесценции образцов с одинаковым содержанием хрома, изготовленных из одного и того же кристалла, различающихся только линейным размером  $L$  вдоль направления возбуждения. Возбуждение люминесценции осуществлялось линейно-поляризованным излучением непрерывных гелий-неонового ( $\lambda_{ex} = 632.8$  нм) и полупроводникового ( $\lambda_{ex} \sim 980$  нм) лазеров. Чтобы исключить попадание лазерного излучения в монохроматор, перед его щелью устанавливались соответствующие фильтры. Регистрация люминесценции осуществлялась неохлаждаемым германиевым приемником. Сигнал с приемника через

\*Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vfeb@fo.gpi.ru

\*\*Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

усилитель Lock-in Amplifier SR530 с помощью GPIB-платы вводился в компьютер. Спектральная чувствительность схемы измерений была определена с помощью эталонной вольфрамовой лампы. Спектры люминесценции измерялись при комнатной температуре. Поляризация люминесценции анализировалась установленной за кристаллом призмой Глана.

Излучением полупроводникового лазера, попадающим в полосы поглощения первого возбужденного уровня  ${}^3T_2$ , возбуждалась люминесценция только ионов  $\text{Cr}^{4+}$ . При использовании He-Ne-лазера происходило эффективное возбуждение люминесценции одновременно ионов  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$ . Люминесценция ионов  $\text{Cr}^{4+}$  возбуждалась в полосе поглощения второго возбужденного уровня  ${}^3T_1$ , люминесценция ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  – за счет поглощения энергии лазерного излучения на краю широкой полосы с  $\lambda_{\text{max}} \sim 680$  нм, являющейся результатом перекрытия трех полос поглощения с энергетическими уровнями  ${}^2T_1$ ,  ${}^4T_2$  и  ${}^2E$  [1, 15].

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис.1 представлены зависимости интенсивностей люминесценции  $I_{\text{lum}}$  и коэффициента поглощения  $\alpha$  ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в кристалле от содержания хрома в исходном расплаве для поляризации зондирующего света  $E \parallel b$  [15]. Для наглядности проведена нормировка  $I_{\text{lum}}$  и  $\alpha$  на соответствующие максимальные значения в исследованном диапазоне. Люминесценция ( $\lambda_{\text{max}} \sim 1120$  нм) возбуждалась излучением He-Ne- и полупроводникового лазеров соответственно во второй ( ${}^3T_1$ ) и первый ( ${}^3T_2$ ) возбужденные уровни, а нормированный коэффициент поглощения приведен для полосы с  $\lambda_{\text{max}} \sim 740$  нм (энергетический уровень  ${}^3T_1$  иона  $\text{Cr}^{4+}$  при поляризации зондирующего света  $E \parallel b$  [15]). Чтобы исключить перепоглощение люминесценции, измерения проводились на образцах кристаллов, изготовленных в виде пластинок толщиной 0.5 мм. При этом максимальное поглощение возбуждающего лазерного излучения для пластины с максимальной концентрацией хрома достигалось при использовании He-Ne-лазера и составляло  $\sim 45\%$ .

Отчетливо видно, что зависимости люминесценции и

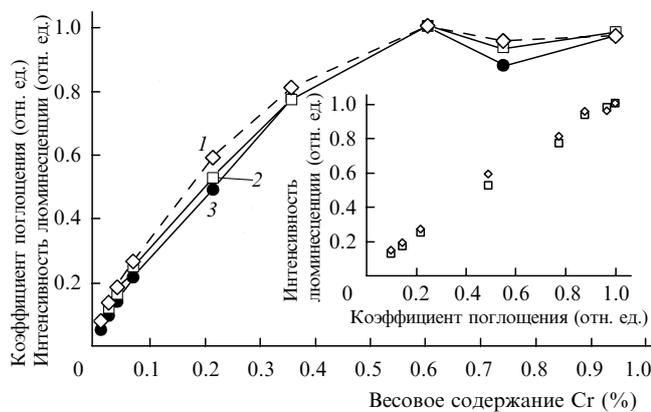


Рис.1. Нормированные на максимум зависимости интенсивностей люминесценции (1, 2) и коэффициента поглощения (3) ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в кристалле от весового содержания хрома в исходном расплаве при  $\lambda_{\text{ex}} = 632.8$  (1) и 980 нм (2); 3 – коэффициент поглощения для длины волны  $\lambda_{\text{max}} = 740$  нм (поляризация зондирующего света  $E \parallel b$ ). На вставке – зависимости интенсивностей люминесценции иона  $\text{Cr}^{4+}$  от нормированного на максимум коэффициента поглощения ( $\lambda_{\text{max}} = 740$  нм).

поглощения для ионов  $\text{Cr}^{4+}$ , приведенные на рис.1, имеют одинаковый характер. По нашим оценкам, использованная схема измерения люминесценции позволяла регистрировать менее чем 10%-ное изменение уровня легирования кристалла. Такая же хорошая корреляция между интенсивностью люминесценции и поглощением ионов  $\text{Cr}^{4+}$  наблюдалась и для серии кристаллов, выращенных в атмосфере с различной концентрацией кислорода при одинаковом содержании хрома в исходном расплаве. В указанной серии объемная концентрация кислорода в атмосфере монотонно увеличивалась для каждого последующего выращиваемого кристалла вплоть до 12%. Полученные результаты являются предметом следующей публикации.

Из рис.1 следует, что заметное насыщение концентрации ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в кристаллах и соответственно интенсивности люминесценции наступает при весовой концентрации хрома в расплаве более 0.6%. На вставке с использованием данных рис.1 показаны зависимости интенсивности люминесценции иона  $\text{Cr}^{4+}$  в кристалле от нормированного на максимум коэффициента поглощения в полосе  $\lambda_{\text{max}} \sim 740$  нм. Поскольку коэффициент поглощения прямо пропорционален концентрации ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в кристалле, указанные зависимости демонстрируют, что во всем исследуемом диапазоне легирования пророст интенсивности люминесценции соответствует проросту концентрации  $\text{Cr}^{4+}$ . Линейный характер зависимостей означает отсутствие процессов тушения и перепоглощения люминесценции (для образцов с толщиной кристалла  $L = 0.5$  мм) во всем диапазоне легирования при ее возбуждении как в  ${}^3T_2$ -, так и в  ${}^3T_1$ -уровни иона  $\text{Cr}^{4+}$ .

С увеличением  $L$  в направлении зондирования возможно появление перепоглощения люминесценции. В наших исследованиях этот эффект отчетливо проявился при измерении люминесценции  $\text{Cr}^{4+}$  в серии образцов с  $L = 3$  мм. Он связан с перепоглощением люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  собственными полосами поглощения в диапазоне 950–1050 нм. На рис.2 показаны зависимости интенсивности люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  от поглощенной в кристалле энергии возбуждения. Кружки демонстрируют рост интенсивности люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  с увеличением поглощенной кристаллом лазерной энергии за счет роста уровня легирования на образцах в виде пластинок толщиной  $L = 0.5$  мм, а квадраты – на образцах с  $L = 3$  мм. Перепоглощение проявляется как нарушение линейности этой зависимости при превышении примерно 70%-ного уровня поглощения энергии лазерного возбуждения.

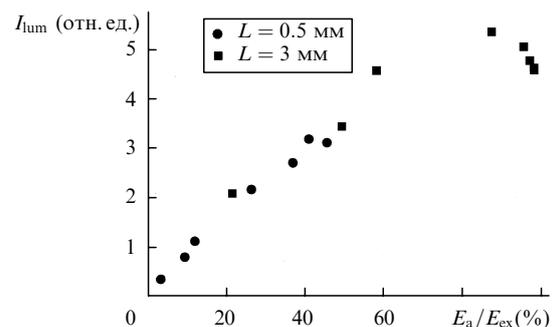


Рис.2. Зависимости интенсивности люминесценции  $I_{\text{lum}}$  ионов  $\text{Cr}^{4+}$  от отношения поглощенной кристаллом энергии  $E_a$  к энергии возбуждения  $E_{\text{ex}}$  ( $\lambda_{\text{ex}} = 632.8$  нм) для серий образцов с  $L = 0.5$  и 3 мм.

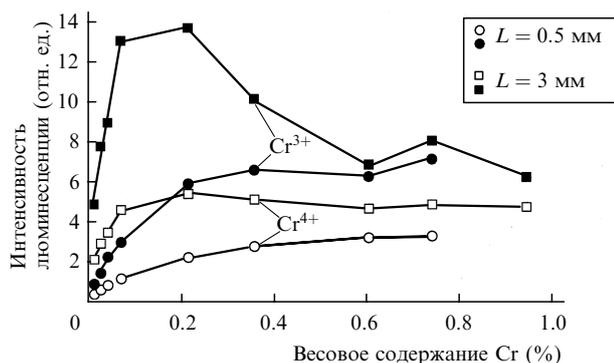


Рис.3. Зависимости интенсивностей люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  и  $\text{Cr}^{4+}$  от весового содержания хрома в исходном расплаве для серий образцов с разными  $L$ ;  $\lambda_{\text{ex}} = 632.8$  нм

Для ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  характерно более сильное перекрытие их полосы люминесценции полосами поглощения ионов  $\text{Cr}^{4+}$ . Поэтому уже для кристаллов с  $L = 3$  мм эффект перепоглощения проявляется в существенно немонотонном характере зависимости интенсивности люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  от общего содержания хрома (рис.3). На рис.3 показаны зависимости изменения интенсивностей люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  и  $\text{Cr}^{4+}$  от содержания хрома в исходном расплаве для образцов кристаллов с  $L = 0.5$  и 3 мм. Хорошо видно, что для слаболегированных кристаллов (весовая концентрация хрома меньше 0.1%) интенсивность люминесценции возрастает пропорционально увеличению содержания хрома в расплаве для обоих значений  $L$ , но уже при концентрациях хрома в расплаве, превышающих  $\sim 0.1\%$ , для кристаллов с  $L = 3$  мм наблюдается ее значительное снижение.

В литературе приводятся противоречивые данные о положении полосы люминесценции  $\text{Cr}^{3+}(2)$ , причем даже для кристаллов, выращенных на одной фирме ( $\lambda_{\text{max}} \sim$

870, 900, 920, 970 нм) [8,9,13]. Для всех исследованных нами кристаллов, в том числе и для выращенного в нейтральной атмосфере, максимум полосы люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  находится в диапазоне 850–900 нм (рис.4, 5). На рис.4 приведены спектры люминесценции для образцов с  $L = 0.5$  и 8 мм, изготовленных из одного и того же кристалла (№ 8 [15]). Как показано ниже, люминесценция ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  поляризована преимущественно вдоль оси  $c$ , а люминесценция ионов  $\text{Cr}^{4+}$  – вдоль оси  $b$ . Поэтому перепоглощения люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  или ионов  $\text{Cr}^{4+}$  определяется интенсивностью полосы поглощения ионов  $\text{Cr}^{4+}$  в соответствующей поляризации (рис.4). При возрастании длины кристалла от 0.5 до 8 мм в суммарном спектре люминесценции из-за перепоглощения в области 950–1050 нм возникает характерный провал, а положение максимума полосы люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  смещается в коротковолновую область (кривая 2, рис.4,а). Перепоглощение люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  также приводит к характерным изменениям формы спектра. В спектре отсутствует излом при  $\lambda \sim 1200$  нм, а максимум полосы люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  смещается в длинноволновую область (ср. кривые 4 и 5 на рис.4,б).

Из рис.3 и 4 следует, что наблюдаемое при возрастании концентрации хрома в исходном расплаве относительное падение интенсивности люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  не связано, как это указывалось в работе [8], с уменьшением содержания  $\text{Cr}^{3+}(2)$ . Основная причина – перепоглощение люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  полосами поглощения, принадлежащими ионам  $\text{Cr}^{4+}$ .

Однако в наших измерениях люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  для образцов кристаллов в виде тонких пластин ( $L = 0.5$  мм) форма спектров оказалась неизменной во всем диапазоне легирования хромом, что означало отсутствие эффекта перепоглощения. Поэтому наблюдаемое насыщение интенсивности люминесценции при весовых концентрациях хрома более 0.3% (рис.3, черные кружки) было следствием насыщения концентрации центров  $\text{Cr}^{3+}$ , отвечающих за данную люминесценцию. Этот вывод отличается от результатов абсорбционной спектроскопии [11, 15], но косвенно может свидетельствовать о наличии нескольких структурных и валентных состояний хрома, отвечающих за суммарное поглощение и люминесценцию, обычно приписываемые только ионам  $\text{Cr}^{3+}(2)$ .

На рис.5 показаны поляризованные спектры люминесценции для кристаллов, выращенных в окислительной (образец № 4,  $\sim 3.0 \times 3.0 \times 3.0$  мм) и нейтральной (образец № 12,  $\sim 5 \times 5 \times 5$  мм) атмосферах. Спектры люминесценции приведены для поляризации возбуждающего излучения He–Ne-лазера  $E||c$ , поскольку для этой поляризации коэффициент поглощения в кристалле на длине волны  $\lambda_{\text{ex}} = 632.8$  нм максимален. Как отмечено выше, направления возбуждения и наблюдения люминесценции при измерениях совпадали, энергия излучения лазера накачки оставалась постоянной. Поэтому приведенные на рис.5 интенсивности люминесценции могут сравниваться для различных поляризаций возбуждающего излучения для каждого кристалла в отдельности. Следует отметить, что спектры поглощения и люминесценции исследованного нами для сравнения коммерческого кристалла [6] оказались идентичными аналогичным параметрам кристалла № 4. Видно существенное различие в поляризациях люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  и  $\text{Cr}^{4+}$ .

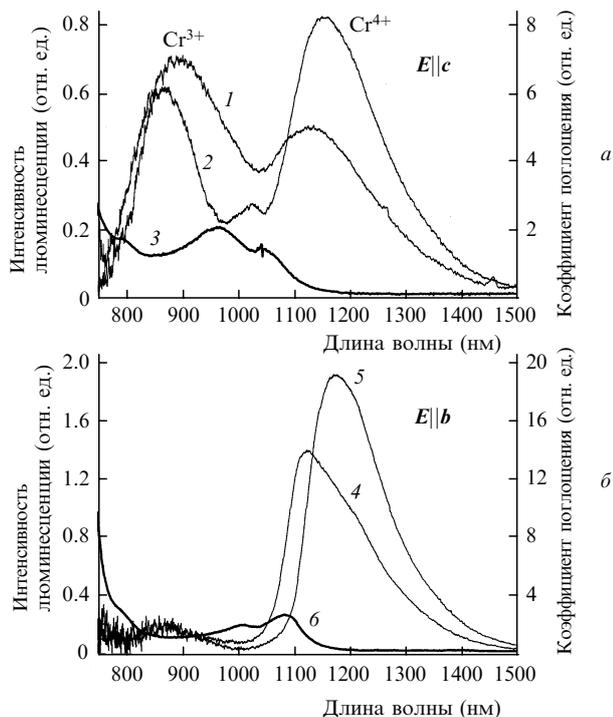


Рис.4. Спектры люминесценции в кристаллах № 8 с  $L = 0.5$  мм (1, 4) и  $L = 8$  мм (2, 5) и поглощения для поляризации зондирующего света  $E||c$  (3) и  $E||b$  (6) для ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  и  $\text{Cr}^{4+}$  ( $\lambda_{\text{ex}} = 632.8$  нм,  $E||c$ ); поляризация люминесценции  $E||c$  (а),  $E||b$  (б).

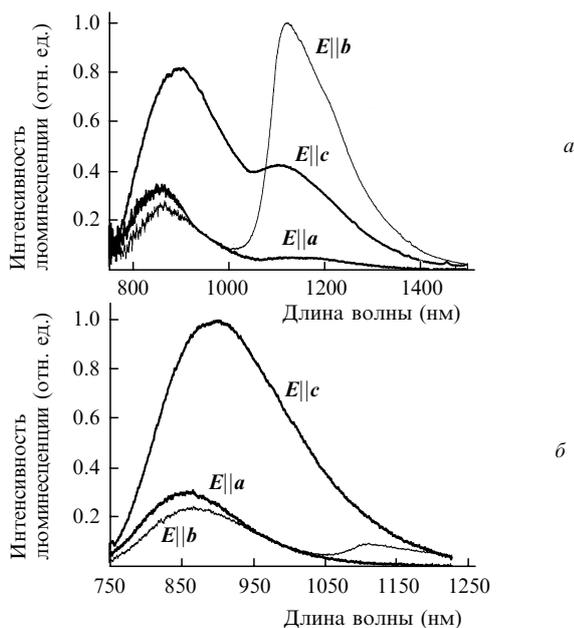


Рис.5. Поляризованные спектры люминесценции для кристаллов, выращенных в окислительной (№ 4, *a*) и нейтральной (№ 12, *б*) атмосферах;  $\lambda_{\text{ex}} = 632.8 \text{ нм}$  ( $E \parallel c$ ).

Люминесценция ионов  $\text{Cr}^{4+}$  поляризована преимущественно вдоль оси *b* при любой поляризации возбуждающего излучения. Поляризация люминесценции может быть охарактеризована отношением  $I_b/I_c/I_a$ , где  $I_b$ ,  $I_c$  и  $I_a$  – интенсивности поляризованной люминесценции, соответствующие проекциям электрического вектора люминесценции на кристаллографические оси *b*, *c* и *a*. Две из этих проекций могут быть получены по результатам измерений в плоскости, перпендикулярной направлению излучения возбуждения, а третья – в плоскости, в которой лежит направление возбуждения. Если перепоглощением люминесценции можно пренебречь, то для всех исследованных кристаллов (вне зависимости от поляризации возбуждающего излучения) поляризация люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  количественно может быть охарактеризована отношением  $I_b:I_c:I_a = 1:0.4:0.06$  (рис.5,*a*).

Максимальная интенсивность люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  наблюдается при поляризации излучения лазера параллельно оси *c* кристалла, соответствующей наибольшему коэффициенту поглощения (см. рис.1,*б* [15]). Широкополосная люминесценция ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  поляризована преимущественно вдоль оси *c* вне зависимости от поляризации возбуждающего излучения и концентрации кислорода в атмосфере ростовой камеры. Люминесценция ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$ , поляризованная вдоль оси *c*, имеет максимум при  $\lambda \sim 900 \text{ нм}$ , вдоль оси *b* – при  $\lambda \sim 860 \text{ нм}$  и вдоль оси *a* – при  $\lambda \sim 850 \text{ нм}$ . Для рассматриваемых кристаллов (№ 4 и № 12) формы спектров люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  были идентичными. Следовательно, на рис.5,*б* представлены неискаженные форма и положение максимумов широкополосной поляризованной люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$ . При этом поляризация люминесценции количественно может быть охарактеризована отношением  $I_b:I_c:I_a = 1:0.3:0.2$  (вне зависимости от поляризации возбуждающего излучения). Причина различного положения максимумов люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  в зависимости от ее поляризации пока не ясна (для ионов  $\text{Cr}^{4+}$  подобный эффект не наблюдается), но

может быть связана с присутствием более чем одного центра, приписываемого одиночным ионам  $\text{Cr}^{3+}$ , или с наличием более сложного структурного образования с участием более чем одного иона хрома. Данную ситуацию может прояснить исследование поляризованных спектров люминесценции ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в кристаллах, дополнительно легированных ионами, которые входят в те же занимаемые хромом структурные октаэдрические позиции и, следовательно, изменяют структуру электронно-колебательных энергетических уровней люминесцирующего иона.

#### 4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведено систематическое исследование поляризованных спектров люминесценции сильнолегированных кристаллов форстерита. Увеличение уровня легирования монокристаллов форстерита для использования их в качестве лазерной среды на ионах  $\text{Cr}^{4+}$  ограничивается насыщением концентрации ионов  $\text{Cr}^{4+}$ . Кроме того, применение сильнолегированных кристаллов требует учета перепоглощения люминесценции  $\text{Cr}^{4+}$  на собственных полосах поглощения. Люминесценции ионов  $\text{Cr}^{4+}$  и  $\text{Cr}^{3+}(2)$  преимущественно поляризованы вдоль взаимноперпендикулярных кристаллографических осей (*b* и *c* соответственно). При этом интенсивности поляризованных вдоль осей *b* и *c* люминесценций соотносятся для ионов  $\text{Cr}^{4+}$  как 1:0.4, а для ионов  $\text{Cr}^{3+}(2)$  – как 0.3:1. Выяснение природы наблюдаемого различия в положениях максимумов люминесценции, приписываемой ионам  $\text{Cr}^{3+}(2)$ , в зависимости от ее поляризации может оказаться полезным при анализе монокристаллов форстерита как активной среды для лазеров на ионах  $\text{Cr}^{3+}$  и является предметом дальнейших исследований.

- Petricevic V., Gayen S.K., Alfano R.R. *OSA Proc. Tunable Sol. State Lasers* (Washington, DC: OSA, 1989, v.5, p.77).
- Yamaguchi Y., Yamagishi K., Sugimoto A., Nobe Y. *OSA Proc. Advanced Sol. State Lasers* (Washington, DC: OSA, 1991, v.10, p.52).
- Jia W., Liu H., Jaffe S., Yen W.M., Denker B. *Phys. Rev. B*, **43**, 5234 (1991).
- Carrig T.J., Pollock C.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 2835 (1993).
- Hazenkamp M.F., Gudel H.U., Atanasov M., Kesper U., Reinen D. *Phys. Rev. B*, **53**, 2367 (1996).
- Baryshevski V.G., Korzhik M.V., Livshitz M.G., Tarasov A.A., Kimaev A.E., Mishkel I.I., Meilman M.L., Minkov B.J., Shkadarevich A.P. *OSA Proc. Advanced Sol. State Lasers* (Washington, DC: OSA, 1991, v.10, p.26).
- Moncorge R., Cormier G., Simkin D.J., Capobianco J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27**, 114 (1991).
- Fujii T., Nagano M., Nemoto K. *OSA Proc. Advanced Sol. State Lasers* (Washington, DC: OSA, 1995, v.24, p.474).
- McKinnie I.T., King T.A. *OSA TOPS Advanced Sol. State Lasers* (Washington, DC: OSA, 1996, v.1, p.76).
- McKinnie I.T., Choe R.Y. *Opt. Quantum Electron.*, **29**, 605 (1997).
- Yamaguchi Y., Yamagishi K., Nobe Y. *J. Crystal Growth*, **128**, 996 (1993).
- Verdun H.R., Thomas L.M., Andrauskas D.M., McCollum T., Pinto A. *Appl. Phys. Letts*, **53**, 2593 (1988).
- Verdun H.R., Thomas L.M., Andrauskas D.M. *Proc. OSA Topical Meeting Tunable Sol. State Lasers* (Washington, DC: OSA, 1989, v.5, p.85).
- Yamazaki T., Anzai Y. *Abstracts 13th Intern. Conf. Crystal Growth* (Kyoto, Japan, 2001, p.89).
- Лебедев В.Ф., Гайстер А.В., Теняков С.Ю., Дианов Е.М., Жариков Е.В. *Квантовая электроника*, **33**, 192 (2003).