

Управляемая магнитным полем поляризованная люминесценция гранатов $Y_3Al_5O_{12}-Tb$ и $Y_3Al_5O_{12}-Ho$

© У.В. Валиев, У.Р. Рустамов, Б.Ю. Соколов

Национальный университет Узбекистана,
700174 Ташкент, Узбекистан

(Поступила в Редакцию 24 мая 2001 г.)

Исследованы спектры циркулярно поляризованной люминесценции гранатов $Y_3Al_5O_{12}-Tb$ и $Y_3Al_5O_{12}-Ho$ в области длин волн ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ -перехода в ионе Tb^{3+} и ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ -перехода в ионе Ho^{3+} . Обнаружено заметное различие в интенсивности ортогональных циркулярно поляризованных компонент ряда линий люминесценции исследованных гранатов. Полученные результаты объясняются "смешиванием" во внешнем магнитном поле электронных состояний ионов Tb^{3+} и Ho^{3+} .

Работа поддержана грантом INTAS N 097-0366.

Как следует из [1], при определенных условиях "смешивание" во внешнем магнитном поле электронных состояний крамерсовского редкоземельного (РЗ) иона приводит к заметному изменению сил осциллятора $4f \rightarrow 4f$ -переходов. Так, например, разность интегральных интенсивностей ортогональных циркулярно поляризованных компонент линий вторичного свечения, связанных с ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ -переходом в ионе Er^{3+} в $Y_3Al_5O_{12}-Er$, при $H = 10$ кОе составила $\sim 15\%$. Еще более заметной модуляции интенсивности линий люминесценции за счет эффекта "смешивания" можно ожидать для некрамерсовских ионов Tb^{3+} и Ho^{3+} в гранатах, поскольку известно, что "смешивание" в поле H электронных состояний играет определяющую роль в формировании зависящих от намагниченности свойств кристаллов с этими ионами [2]. Действительно, как показали наши измерения, магнитное поле оказывает существенное влияние на интенсивность циркулярно поляризованных компонент линий вторичного свечения, обусловленных некоторыми излучательными переходами в ионах Tb^{3+} и Ho^{3+} в матрице $Y_3Al_5O_{12}$, оставляя практически неизменными их спектральное положение, т.е. можно говорить об управляемой полем люминесценции исследованных гранатов.

1. Образцы и методика измерений

В работе использовались монокристаллы $Y_3Al_5O_{12}-Tb$ и $Y_3Al_5O_{12}-Ho$ с концентрацией РЗ ионов ~ 5 wt.%. Были исследованы спектры циркулярно поляризованной люминесценции и спектры степени магнитной циркулярной поляризации люминесценции (МЦПЛ), связанные с ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ -переходом в ионе Tb^{3+} и с ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ -переходом в ионе Ho^{3+} . Как возбуждение, так и наблюдение люминесценции осуществлялись "на просвет" в поле H напряженностью до 10 кОе при продольном относительно направления распространения света намагничивании. Степень МЦПЛ $P = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$, где I_+ , I_- — интенсивности двух ортогональных циркулярно поляризованных компонент линии люминесценции, измерялась по методике с модуляцией поляризации вторичного

свечения пьезоэлектрическим модулятором [1,3]. При исследованиях спектров I_+ , I_- оптическое разрешение составляло ~ 1 и ~ 2 см $^{-1}$ при измерениях дисперсии P . Относительная погрешность измеряемых величин P и I_+ , I_- во всех экспериментах не превышала 5%.

Поскольку нам не была известна энергетическая структура 5S_2 -мультиплета иона Ho^{3+} , были проведены исследования спектра оптического поглощения гольмий-иттриевого граната-алюмината в области ${}^5I_8 \rightarrow {}^5S_2$ -перехода. При этом для нахождения положения актуальных энергетических подуровней 5S_2 -мультиплета использовались сведения о кристаллическом расщеплении основного 5I_8 мультиплета иона Ho^{3+} в матрице $Y_3Al_5O_{12}$ из [4].

2. Полученные результаты и их обсуждение

Спектры циркулярно поляризованной люминесценции и степени МЦПЛ тербий-иттриевого граната-алюмината, связанные с ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ -переходом, показаны соответственно на рис. 1, 2. Отметим довольно значительную величину степени МЦПЛ этого граната на линиях люминесценции, обозначенных на рисунках цифрами 1–4, достигающей, например, для линии 2 при $T = 90$ К в поле $H = 5$ кОе ~ 0.4 (даже при низкой температуре в условиях парамагнитного насыщения типичное значение P в РЗ соединениях составляет $\sim 10^{-1}$ [5,6]).

Обращает на себя внимание существенная разница в спектрах ортогональных циркулярно поляризованных компонент линии 2: для этой линии люминесценции интегральные интенсивности I_+ и I_- вне зависимости от температуры в поле $H = 10$ кОе различаются примерно в 1.4 раза. При этом из данных, полученных при $T = 90$ К, отчетливо видно, что линия 2 имеет дублетную структуру, и наиболее сильное влияние магнитное поле оказывает на интенсивности I_+ и I_- длинноволновой компоненты дублета (рис. 1). В то же время для линии 3 различие в интенсивностях I_+ и I_- становится заметным лишь при низкой температуре.

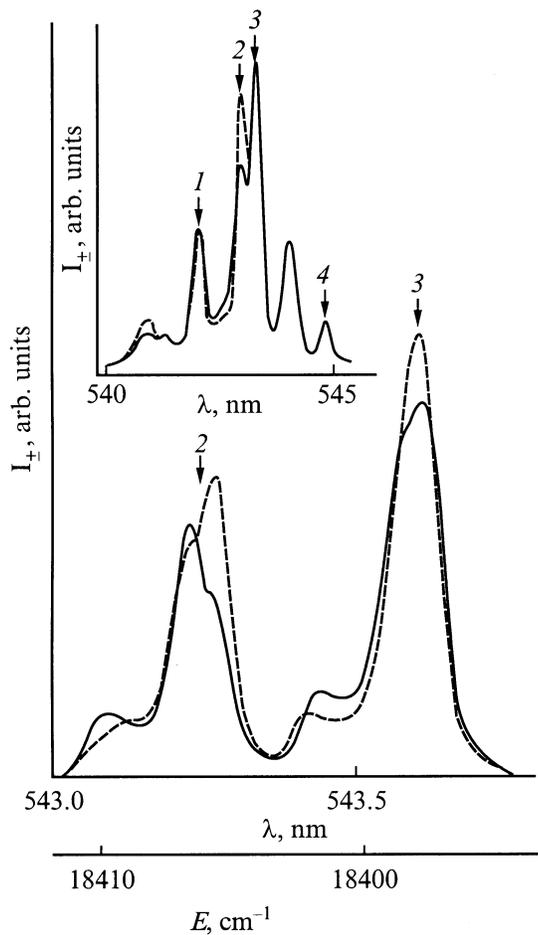


Рис. 1. Фрагмент спектра циркулярно поляризованных компонент линий люминесценции $Y_3Al_5O_{12}-Tb$, полученный при $T = 90$ К в поле $H = 5$ кОе (сплошная линия — интенсивность левополяризованной компоненты, штриховая — интенсивность правополяризованной компоненты). На вставке: спектр циркулярно поляризованной люминесценции $Y_3Al_5O_{12}-Tb$ при $T = 300$ К, $H = 10$ кОе (сплошной и штриховой линиями показаны ортогональные компоненты МЦПЛ).

Аналогичная разница в спектрах I_+ и I_- наблюдается при $T = 90$ К и для линии 4 (на рис. 1 не показано). Что же касается линии 1, то при $T = 90$ К (так же как и при комнатной температуре) ее ортогональные циркулярно поляризованные компоненты остаются равными по интенсивности и лишь незначительно сдвинуты друг относительно друга по энергии.

Как известно, сдвиг по энергии компонент I_+ и I_- линии люминесценции связан с зеемановским расщеплением состояний, между которыми происходит данный излучательный переход; "примешивание" в поле H к комбинирующим в оптическом переходе состояниям других близлежащих состояний РЗ иона приводит к независимому от T различию сил осциллятора ортогональных компонент соответствующей линии люминесценции, а различие в термической заселенности состояний излучательного перехода — к температурной зависимости

величины разности $I_+ - I_-$. На основании этого, а также принимая во внимание характерное поведение дисперсии и температурной зависимости A, B, C — членов степени МЦПЛ [7,8] (рис. 2), можно заключить, что в спектрах МЦПЛ $Y_3Al_5O_{12}-Tb$ линии 1, 2 обусловлены переходами типа "синглет-квазидублет", а линии 3, 4 — переходами типа "квазидублет-синглет" либо "квазидублет-квазидублет".

Используя результаты анализа приведенных на рис. 1, 2 спектров, а также известные данные по энергетическому спектру 5D_4 -мультиплета иона Tb^{3+} в матрице $Y_3Al_5O_{12}$ [9], можно построить схему магнитооптически активных излучательных $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ -переходов, показанную на рис. 2 (при этом предполагалось, что актуальными с точки зрения магнитооптики состояниями 5D_4 -мультиплета являются состояния двух квазидублетов Γ_2, Γ_1 и $\Gamma_1\Gamma_4$, а также синглета Γ_4).

Таким образом, согласно рассмотренной модели $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ -перехода, значительное изменение в магнитном поле интенсивностей I_+ и I_- более длинноволновой компоненты линии 2 связано с сильным "примешиванием" к верхнему подуровню квазидублета (с энергией

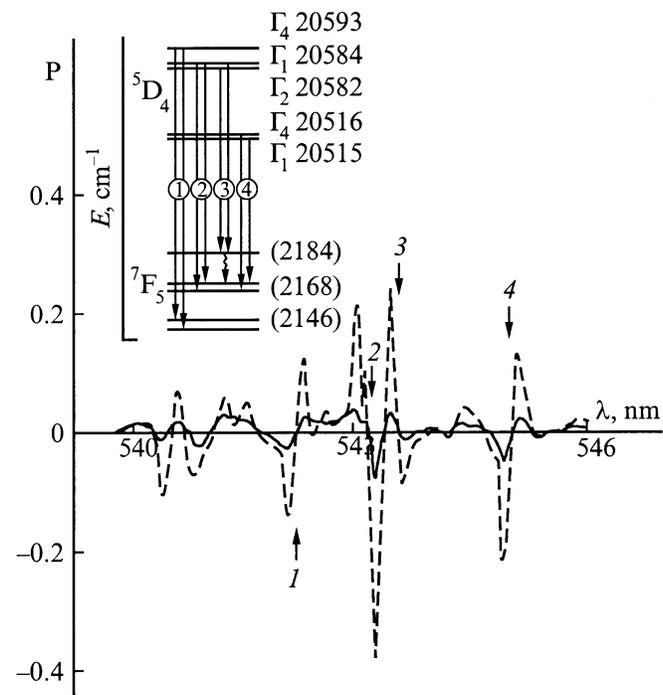


Рис. 2. Спектр степени магнитной циркулярной поляризации люминесценции $Y_3Al_5O_{12}-Tb$, полученный при $H = 5$ кОе: сплошная линия — $T = 300$ К, штриховая — $T = 90$ К. Сверху показана схема магнитооптически активных $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ -переходов в ионе Tb^{3+} (использован энергетический спектр 5D_4 -мультиплета из [9]). В скобках указаны энергии подуровней 7F_5 -мультиплета, найденные экспериментально. "Смешивание" в поле H состояний 7F_5 -мультиплета показано волнистой линией. Цифры на стрелках — нумерация соответствующих линий люминесценции.

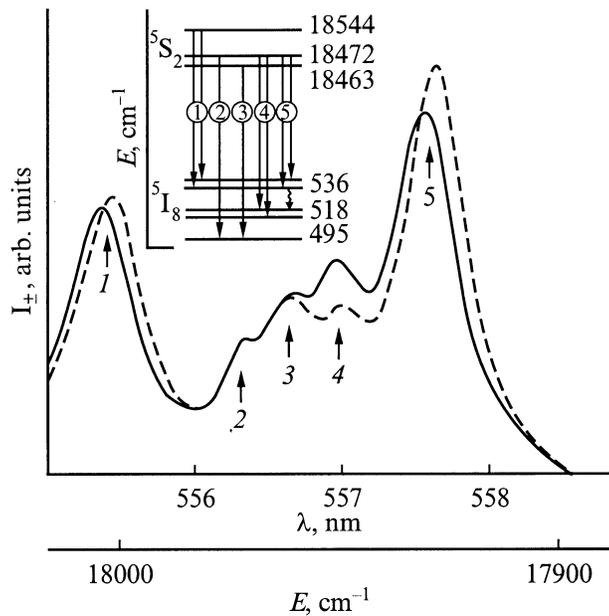


Рис. 3. Фрагмент спектра циркулярно поляризованных компонент линий люминесценции $Y_3Al_5O_{12}-Ho$, полученный при $T = 300$ К в поле $H = 10$ кОе (обозначения аналогичны принятым на рис. 1). Сверху показана схема излучательных ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ -переходов в ионе Ho^{3+} (обозначения аналогичны принятым на рис. 2).

$E = 2168 \text{ cm}^{-1}$) 7F_5 -мультиплета иона Tb^{3+} состояний ближайшего синглетного уровня.¹

Качественно близкая к рассмотренной выше ситуация наблюдается для ряда переходов между состояниями 5S_2 и 5I_8 -мультиплетов иона Ho^{3+} в $Y_3Al_5O_{12}-Ho$. Как видно из представленного на рис. 3, фрагмента спектра циркулярно поляризованной люминесценции этого граната в области длин волн ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ -перехода, линии 1, 4, 5 имеют заметное различие в интегральных интенсивностях I_+ и I_- уже при комнатной температуре (аналогичное различие спектра МЦПЛ наблюдается и при $T = 90$ К). Очевидно, что различие в спектрах I_+ и I_- для линий 1, 4, 5 нельзя объяснить в модели перехода "квазидублет-синглет", считая разность $(I_+ - I_-)$ связанной с различием термической заселенности компонент квазидублета. Действительно, в этом случае [7,8] $(I_+ - I_-)/(I_+ + I_-) \approx g\beta H/\beta T$ (где g — g -фактор квазидублета, β — магнетон Бора, k — постоянная Больцмана), и для получения наблюдаемой при $T = 300$ К разности $(I_+ - I_-)$ в области линий 1, 4, 5 необходимо предположить наличие у квазидублета нереально большого g -фактора (что в свою очередь должно приводить к значительно большему, чем полученное в эксперименте, зеемановскому расщеплению соответствующих линий люминесценции).

¹ Заметное различие спектров I_+ и I_- для линии 2 нельзя объяснить "смешиванием" состояний 5D_4 -мультиплета, поскольку, согласно [8], в МЦПЛ этого граната на ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_6$ -переходе в ионе Tb^{3+} подобного эффекта не наблюдалось.

Схема излучательных ${}^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$ -переходов в ионе Ho^{3+} , построенная на основе результатов измерений МЦПЛ в $Y_3Al_5O_{12}-Ho$ при использовании данных по энергетическому спектру 5S_2 -мультиплета, найденных из спектров оптического поглощения этого граната, приведена на рис. 3. Как видно из этой схемы, к заметному различию сил осциллятора переходов 1, 4, 5 в ортогональных поляризациях приводит "смешивание" в поле H состояний двух квазидублетов, расположенных в верхней части основного мультиплета иона Ho^{3+} .

Полученные результаты позволяют заключить, что сильное влияние магнитного поля на силы осциллятора $4f \rightarrow 4f$ -переходов является достаточно общим явлением в РЗ системах с квазидублетной структурой энергетического спектра и вклад "смешивания", которым обычно пренебрегают, вблизи соответствующих линий поглощения или люминесценции может играть заметную роль в магнитооптике таких систем.

Список литературы

- [1] Ш.У. Абдуллаев, У.В. Валиев, Б.Ю. Соколов. Оптика и спектроскопия **87**, 3, 419 (1999).
- [2] А.К. Звездин, В.М. Матвеев, А.А. Мухин, А.И. Попов. Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах. М. (1985). 294 с.
- [3] У.В. Валиев, Т. Асильов, Р.А. Салюков. ПТЭ **4**, 87 (1994).
- [4] V. Nekvasil. Phys. Stat. Sol. (b) **94**, K41 (1979).
- [5] Е.Л. Ивченко, Е.В. Максимов, В.Н. Медведев. Оптика и спектроскопия **47**, 6, 1096 (1979).
- [6] В.С. Запаский, П.П. Феофилов. Оптика и спектроскопия **41**, 6, 1051 (1976).
- [7] В.С. Запаский, П.П. Феофилов. УФН **116**, 1, 41 (1975).
- [8] Ш.У. Абдуллаев, У.В. Валиев, Д.Р. Джураев, В. Неквасил. Оптика и спектроскопия **84**, 3, 471 (1998).
- [9] R. Baurer, J. Heber, D. Mateika. Z. Phys. B: Condens Matter **64**, 201 (1986).