

## СПЕКТРЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КРИСТАЛЛОВ $Y_3Al_5O_{12}-Er^{3+}$ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ДЕФЕКТЫ

Х.С. Багдасаров, В.И. Жеков, Т.М. Мурина, А.В. Попов,  
А.М. Прохоров, Е.А. Федоров

*Показано, что при воздействии лазерного излучения на локальные частицы кристаллов  $Y_3Al_5O_{12}-Er^{3+}$  происходит разогрев их и областей, прилегающих к ним, до температур  $\sim 2000$  К, что приводит к резкому уширению линий люминесценции ионов  $Er^{3+}$  и, по-видимому, к перераспределению интенсивностей межштарковских переходов.*

В работе [1] исследована антистоксова люминесценция ионов  $Er^{3+}$  в кристаллах  $Y_3Al_5O_{12}$  с уровня  $^4S_{3/2}$ . Возбуждение кристаллов осуществлялось в полосу поглощения электронно-колебательных переходов  $^4I_{15/2} - ^4I_{11/2}$ , связанных с излучением фонона ( $\lambda = 0,94$  мкм), и в обнаруженные нами новые полосы поглощения ( $\lambda = 1,03 - 1,07$  мкм), которые были связаны либо с электронно-колебательными переходами с поглощением фонона, либо с поглощением ионами  $Er^{3+}$ , находящимися в сильно поглощающих дефектах субмикронного размера [2]. Интенсивность антистоксовой люминесценции различно зависела от спектральной области возбуждения и от плотности энергии накачки (рис. 1). Если бы новые полосы поглощения принадлежали электронно-колебательным переходам, связанным с поглощением фононов ионами  $Er^{3+}$  находящимися в позиции "с", то зависимости интенсивности люминесценции с уровня  $^4S_{3/2}$  от длины волны возбуждения не должно было бы наблюдаться. Поэтому новые полосы были связаны с поглощением ионами  $Er^{3+}$ , находящимися в локальных дефектах. Однако объяснить более резкую зависимость антистоксовой люминесценции от плотности накачки при возбуждении кристаллов излучением  $\lambda = 1,064$  мкм не удалось, так как средняя по объему концентрация ионов  $Er^{3+}$ , находящихся в позиции "с", как показывают оценки, на три порядка больше, чем суммарная концентрация ионов  $Er^{3+}$  в локальных дефектах.

Информативным методом исследования кристаллов является изучение спектроскопических параметров ионов активатора, так как они чувствительны к изменению ионной структуры кристаллов, к изменению давления, температуры и т.д.

В настоящей работе с целью определения природы новых линий поглощения исследован спектр люминесценции ионов  $Er^{3+}$  на переходе  $^4I_{11/2} - ^4I_{15/2}$  при возбуждении кристаллов в области поглощения новых линий ( $\lambda = 1,064$  мкм) и в линии поглощения ионов  $Er^{3+}$ , находящихся в позиции "с" ( $\lambda = 0,532$  мкм).

Возбуждение кристаллов  $Y_{1,5}Er_{1,5}Al_5O_{12}$  осуществлялось излучением YAG-Nd лазера, работающего на длинах волн 1,064 мкм (длительность импульса  $\tau_p = 75$  мкс, энергия  $E_p = 0,5 - 0,05$  Дж) и 0,532 мкм ( $\tau_p = 10$  нс,  $E_p = 0,01$  Дж). Излучение фокусировалось с помощью линзы с  $F = 120$  мм ( $S \approx 10^{-4}$  см<sup>2</sup>). Коэффициенты объемного поглощения кристаллов  $Y_{1,5}Er_{1,5}Al_5O_{12}$  на длинах волн 1,064 и 0,532 мкм равны соответственно  $2 \cdot 10^{-3}$  и  $2,5$  см<sup>-1</sup>. Спектр люминесценции записывался с помощью Voxcar averager Model 162 и монохроматора МДР-23.

На рис. 2 приведены фрагменты спектров поглощения (а) и люминесценции (б, в) кристаллов  $Y_{1,5}Er_{1,5}Al_5O_{12}$  при возбуждении их в различные спектральные области при  $T = 300$  К. При возбуждении кристаллов излучением с  $\lambda = 0,532$  мкм спектр люминесценции по положению линий межштарковских переходов и соотношениям интенсивностей между ними соответствует спектру поглощения, что характерно для трехвалентных редкоземельных ионов. В спектрах люминесценции кристаллов ( $\lambda = 1,064$  мкм) наблюдаются сильные изменения в соотношениях интенсивностей линий и их ширине, а также зависимость

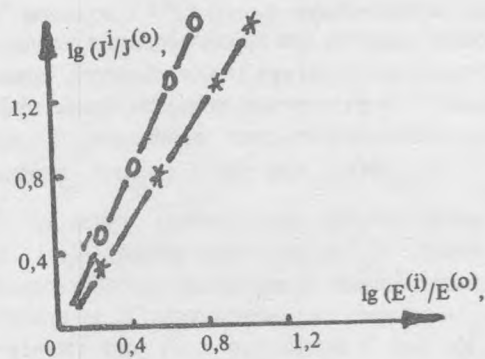


Рис. 1. Зависимость интенсивности антистоксовой люминесценции от плотности накачки кристалла  $Y_3Al_5O_{12}-Er^{3+}$  излучением  $Y_3Al_5O_{12}-Nd^{3+}$  лазера на длине волны 0,94 мкм(\*) и 1,064 мкм(o).

Рис. 2. Спектры поглощения (а) и люминесценции (б, в) ионов  $Er^{3+}$  в кристаллах  $Y_3Al_5O_{12}$  при возбуждении излучением  $Y_3Al_5O_{12}-Nd^{3+}$  лазера с длиной волны соответственно 0,532 и 1,064 мкм.

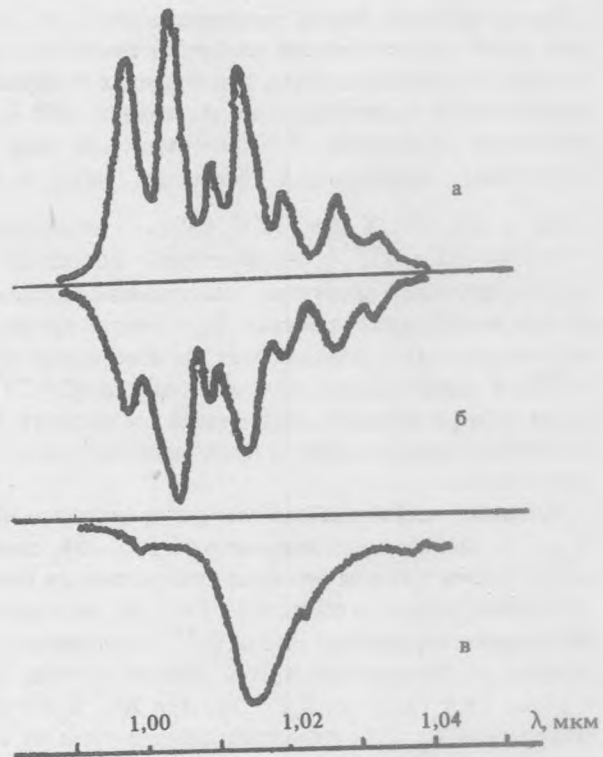
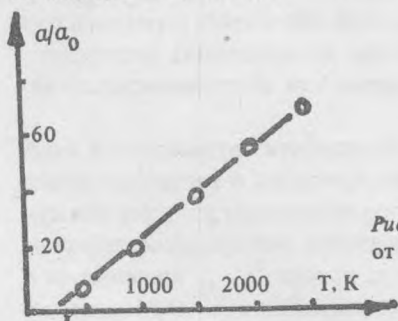


Рис. 3. Теоретическая зависимость коэффициента поглощения кристалла  $Y_3Al_5O_{12}-Er^{3+}$  от температуры (переход  $^4I_{15/2} - ^4I_{11/2}$  с поглощением фонона).



этих параметров от плотности энергии накачки. При уменьшении плотности энергии накачки ( $\lambda=1,064$  мкм) спектр люминесценции кристаллов приходит в соответствие со спектром поглощения. В области 1,03 – 1,06 мкм наблюдается бесструктурная люминесценция с уровня  $^4I_{11/2}$ .

Анализируя спектры люминесценции (рис. 2б, в), можно утверждать, что они связаны с ионами  $Er^{3+}$ , находящимися в позиции "с", так как число и спектральное положение линий межштарковских переходов  $^4I_{11/2} - ^4I_{15/2}$  при возбуждении  $\lambda = 1,064$  мкм совпадают с положением и количеством линий в спектре люминесценции при возбуждении кристалла  $\lambda = 0,53$  мкм. Следовательно, наблюдаемые новые линии принадлежат электронно-колебательному крылу иона  $Er^{3+}$  с поглощением фонона.

Рассмотрим причины, приводящие к изменению ширины и интенсивности линий в спектре люминесценции ( $\lambda = 1,064$  мкм). Изменение ширины линий люминесценции мы связываем с нагревом кристалла. Экспериментально установлено, что температурная зависимость ширины линии поглощения ( $\Delta\nu$ ) в интервале 300–800 К описывается соотношением  $\Delta\nu = 0,023 \cdot \Delta T$ ; при  $T = 300$  К  $\Delta\nu = 8$  см $^{-1}$ . Ширина линии люминесценции ( $\lambda = 0,532$  мкм) при  $T = 300$  К совпадает с шириной линии поглощения. Ширина линии люминесценции ( $\lambda = 1,064$  мкм) отличается от ширины линии поглощения приблизительно в шесть раз (50 см $^{-1}$ ). Для того, чтобы объяснить такую ширину, необходимо предположить, что температура возбуждаемой области кристалла больше 1500 К.

Коэффициент объемного поглощения кристаллов  $Y_{1,5}Er_{1,5}Al_5O_{12}$  на  $\lambda = 1,064$  мкм составляет  $2 \times 10^{-3}$  см $^{-1}$ . При плотности энергии накачки  $\sim 10$  Дж/см $^3$  разогрев возбуждаемого объема составляет  $\sim 10$  °С. Если учесть, что коэффициенты поглощения частиц субмикронного размера  $\geq 10^3$  см $^{-1}$ , то возможен разогрев до высоких температур как самих частиц, так и объема кристалла, прилегающего к ним.

Таким образом, спектр люминесценции ( $\lambda = 1,064$  мкм) соответствует ионам  $\text{Er}^{3+}$  в позиции "с", и ширина линий люминесценции зависит от температуры. Из этого следует, что люминесценция наблюдается из горячих областей кристалла, прилегающих к дефекту. Средняя температура таких областей, оцененная по ширине линии люминесценции, составляет 1500 К. Ионы  $\text{Er}^{3+}$  в разогретых областях более эффективно поглощают излучение  $\lambda = 1,064$  мкм за счет электронно-колебательных переходов. Коэффициент поглощения определяется формулой  $a(\omega) = \bar{n}(\omega) \sum_{i,j} p_i f_{ij} \Phi(\omega)$ ; где  $\omega$  – частота перехода;  $p_i = \exp(-\Delta E_i/kT) / \sum \exp(-\Delta E_i/kT)$  – населенность штарковской компоненты уровня;  $\bar{n}(\omega) = [\exp(\hbar\omega/kT) - 1]^{-1}$  – плотность фононных состояний;  $f_{ij}$  – сила осциллятора;  $\Phi(\omega)$  – функция, характеризующая операторы электронно-фононного взаимодействия и плотность колебательных частот во всех колебательных ветвях. Если учесть, что  $\Phi(\omega)$  и  $f_{ij}$  не зависят от температуры /3/, то при изменении температуры  $a(\omega)$  определяется произведением  $p_i \bar{n}(\omega)$ . Из рис. 3 видно, что  $a(\omega)$  при температурах  $\geq 1500$  К увеличивается приблизительно в 30 – 70 раз, что приводит к увеличению плотности возбуждения ионов эрбия в областях, прилегающих к дефекту. В этом случае интенсивность люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  из объемов, прилегающих к локальным частицам, становится соизмеримой с люминесценцией ионов  $\text{Er}^{3+}$  всего объема.

Причиной наблюдаемого перераспределения интенсивностей межштарковских переходов  $^4I_{11/2}$  –  $^4I_{15/2}$  в спектрах люминесценции (рис. 2в), по-видимому, является деформация электрических полей вокруг ионов эрбия за счет высоких градиентов температуры и давления в этих областях.

Люминесценцию в области 1,03 – 1,06 мкм не представляется возможным объяснить электронно-колебательными переходами ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Зависимость интенсивности свечения электронно-колебательных переходов от температуры в этой области должна удовлетворять соотношению  $J(\omega, T) / J(\omega, T_0) \sim (\bar{n}(\omega, T) + 1) / (\bar{n}(\omega, T_0) + 1)$ , где  $J(\omega, T_0)$  – интенсивность электронно-колебательных переходов при температуре  $T_0$ . При изменении температуры от 300 до 2000 К интегральная интенсивность электронно-колебательных переходов должна была бы увеличиться в 3–4 раза, в то время как экспериментально наблюдается увеличение интенсивности более, чем в 25 раз.

Полученные в работе результаты позволяют объяснить наблюдаемые зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции от плотности энергии накачки при возбуждении кристалла в различные спектральные области /1/. При возбуждении кристаллов излучением  $\lambda = 1,064$  мкм происходит разогрев локальных объемов кристалла, где возрастает коэффициент поглощения, обусловленный электронно-колебательными переходами ионов  $\text{Er}^{3+}$ . При этом плотность возбужденных ионов на уровне  $^4I_{11/2}$  повышается в 30–70 раз по сравнению с плотностью возбужденных ионов при накачке их излучением  $\lambda = 0,94$  мкм, что объясняет наблюдаемые зависимости (рис. 1).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ж е к о в В. И. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, 56 (1989).
2. Б а г д а с а р о в Х.С. и др. 7 Всесоюзная конференция по росту кристаллов. Тезисы докладов, М., 1988, т. 3, с. 386.
3. А г л а д з е Н. И. и др. Препринт ИСАН № 1, Троицк, 1987.
4. С o h e n E., M o o s H. W. Phys. Rev., 161, 258 (1967).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 6 декабря 1989 г.