

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КРИСТАЛЛАХ ИТТРИЙ-СКАНДИЙ-ГАЛЛИЕВЫХ ГРАНАТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ХРОМА И ЭРБИЯ

Д.А. Зубенко, М.А. Ногинов, В.А. Смирнов, И.А. Щербаков

*В кристаллах иттрий-скандий-галлиевых гранатов, активированных ионами хрома и ионами редкоземельных элементов, исследованы процессы трансформации энергии электронных возбуждений. Установлено влияние нелинейных процессов на генерационные свойства лазеров на основе данных кристаллов.*

Сенсибилизация люминесценции ионов редкоземельных элементов ( $\text{TR}^{3+}$ ) ионами хрома ( $\text{Cr}^{3+}$ ) в скандиевых гранатах повышает эффективность лазеров, созданных на основе данных кристаллов /1/. В процесс формирования инверсной населенности на генерационных переходах ионов  $\text{TR}^{3+}$  в этих кристаллах вносят вклад непосредственная оптическая накачка в полосы поглощения ионов  $\text{TR}^{3+}$ , перенос энергии  $\text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{TR}^{3+}$  а также нелинейные взаимодействия возбужденных ионов  $\text{TR}^{3+}$  /2/.

Одним из основных объектов исследования в настоящей работе является кристалл иттрий-скандий-галлиевого граната, активированный ионами хрома и эрбия (ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ ). Процессы безызлучательного переноса энергии  $\text{Cr} \rightarrow \text{Er}$ ,  $\text{Er} \rightarrow \text{Cr}$ ,  $\text{Er} \rightarrow \text{Er}$  в данном кристалле исследованы в работе /3/. Взаимодействие возбужденных ионов эрбия исследовано не было.

Процесс взаимодействия возбужденных ионов эрбия в состояниях  ${}^4I_{13/2}$  ( ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ) уменьшает заселенность нижнего лазерного уровня  ${}^4I_{13/2}$  и заселяет верхний —  ${}^4I_{11/2}$  (рис. 1), что при высоких плотностях накачки снимает самоограничение с генерационного перехода  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  и обеспечивает возможность получения на нем непрерывной генерации /4/. Процесс взаимодействия возбужденных ионов эрбия в состояниях  ${}^4I_{11/2}$  ( ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4S_{3/2}$ ) и последующие кросс-релаксационные процессы ( ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и др.) приводят к тому, что из двух возбужденных ионов эрбия в состояниях  ${}^4S_{3/2}$ ,  ${}^2H_{11/2}$  образуется один ион в состоянии  ${}^4I_{13/2}$  и другой — в состоянии  ${}^4I_{11/2}$ . Это уменьшает величину инверсной населенности на лазерном переходе  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ .

В экспериментальных исследованиях для возбуждения кристалла ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Er}^{3+}$  использовалось излучение аргонового лазера (как импульсное, так и стационарное), при этом число возбужденных ионов  $\text{Er}^{3+}$  составляло менее 2% от общей концентрации  $\text{Er}^{3+}$ .

Система балансных уравнений, описывающая процессы заселения и релаксации возбужденных ионов эрбия в кристалле ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ , имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dn_4}{dt} &= K_4 - \beta n_1 n_4 + F_3 (n_3, C_{\text{Er}}, t, C_{3\text{DA}}, C_{3\text{DD}})/2, \\ \frac{dn_3}{dt} &= \beta n_1 n_4 - (W_{31} + W_{32}) n_3 - F_3 (n_3, C_{\text{Er}}, t, C_{3\text{DA}}, C_{3\text{DD}}) + F_2 (n_2, C_{\text{Er}}, t, C_{2\text{DA}}, C_{2\text{DD}})/2 + K_3, \\ \frac{dn_2}{dt} &= \beta n_1 n_4 + W_{32} n_3 - W_{21} n_2 - F_2 (n_2, C_{\text{Er}}, t, C_{2\text{DA}}, C_{2\text{DD}}), \\ n_1 + n_2 + n_3 + n_4 &= 1, \end{aligned}$$

где индексы 1, 2, 3, 4 — относятся соответственно к состояниям  ${}^4I_{15/2}$ ,  ${}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4S_{3/2}$  (рис. 1);  $W_{ij}$  — вероятность внутрицентрового распада  $i \rightarrow j$ ;  $K_3$  и  $K_4$  — скорости накачки соответственно в уровни  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4S_{3/2}$ ;  $\beta$  — константа кросс-релаксационного распада ( ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и другие процессы);  $F_i (n_j, C_{\text{Er}}, t, C_{i\text{DA}}, C_{i\text{DD}})$  — скорости процессов взаимодействия возбужденных ионов  $\text{Er}^{3+}$ ;  $C_{i\text{DA}}$  и  $C_{i\text{DD}}$  — микропараметры донор-акцепторного и донор-донорного взаимодействий.

Если средняя скорость сближения возбуждений превышает скорость взаимодействия возбужденных ионов эрбия на минимальном расстоянии, нелинейные процессы могут быть описаны выражением вида  $a_i n_i^2$ , где величины  $a_i$  не зависят ни от концентрации взаимодействующих возбужденных ионов, ни от времени.

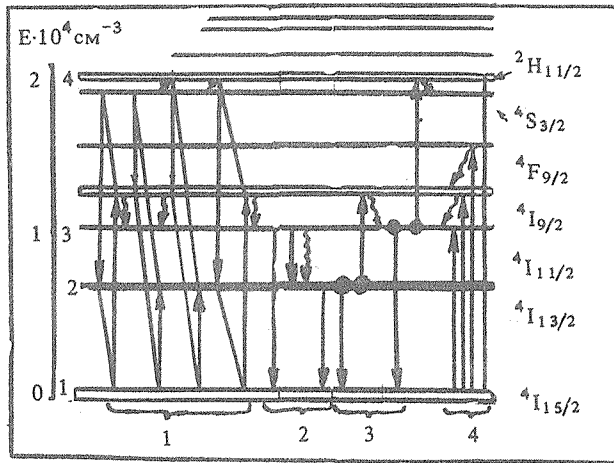


Рис. 1. Схема энергетических состояний ионов эрбия: 1 – кросс-релаксация, 2 – внутрицентровая релаксация, 3 – нелинейные взаимодействия, 4 – накачка.

Экспериментально установлено, что при концентрациях ионов эрбия  $C_{Er} > 1 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  функции  $n_2^2(K_4)$  и  $n_3^2(K_4)$  при высоких уровнях возбуждения линейно зависят от  $K_4$ . Таким образом  $F_i(n_i, C_{Er}, t, C_{iDD}) = a_i n_i^2$ , где  $a_i = \text{const}$ ,  $i = 2, 3$ .

На основе анализа функциональных зависимостей населенностей уровней  ${}^4I_{13/2} - n_2$  и  ${}^4I_{11/2} - n_3$  от плотности стационарной накачки и времени в кристалле ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Er}^{3+}$  определены величины параметров  $W_{ij}$  и  $\beta$ , а также константы нелинейных взаимодействий ионов эрбия  $a_i/C_{Er}$  ( $i = 2, 3$ ):  $W_{21} = 310 \text{ с}^{-1}$ ,  $W_{31} = 110 \text{ с}^{-1}$ ,  $W_{32} = 800 \text{ с}^{-1}$ ;  $\beta > 10^5 \text{ с}^{-1}$ ,  $a_3/C_{Er} = 7,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3/\text{с}$ ,  $a_2/C_{Er} = 2,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3/\text{с}$ . Последние три значения определены при  $C_{Er} = (1,5 - 6) \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Значения параметров  $a_i/C_{Er}$ , определенные различными методами, хорошо совпадают друг с другом и не зависят от концентрации ионов  $\text{Er}^{3+}$ .

Таким образом, разработана адекватная модель активной лазерной среды ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Er}^{3+}$ . Измерена вся совокупность параметров, определяющих процессы заселения и релаксации возбужденных состояний  ${}^4I_{13/2}$ ,  ${}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4S_{3/2} \text{ Er}^{3+}$ . Отсутствие зависимости величин  $a_i/C_{Er}$  от концентрации ионов эрбия  $C_{Er}$ , от населенностей возбужденных состояний  $n_i$  и от времени  $t$  свидетельствует о наличии сверхбыстрого миграционного механизма нелинейных взаимодействий в указанном диапазоне концентраций.

На основе созданной модели активной среды ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Er}^{3+}$  проведено численное моделирование процессов заселения и релаксации лазерных уровней  ${}^4I_{11/2}$ ,  ${}^4I_{13/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Показано, что в режиме свободной генерации именно благодаря нелинейным процессам эффективность работы лазера практически не зависит от длительности импульса накачки вплоть до величины  $\sim 2 \text{ мс}$ . В режиме модулированной добротности взаимодействие возбужденных ионов эрбия снижает величину инверсной населенности в канале генерации, при этом наиболее эффективным является короткий ( $\sim 30 \text{ мкс}$ ) импульс накачки. Показано, что наиболее эффективным каналом образования инверсной населенности на переходе  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ионов  $\text{Er}^{3+}$  является сенсбилизация люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  ионами  $\text{Cr}^{3+}$ , при которой заселяется только верхний лазерный уровень  ${}^4I_{11/2}$  и не заселяется нижний —  ${}^4I_{13/2}$ . Установлено, что примесное тушение нижнего лазерного уровня  ${}^4I_{13/2}$  повышает эффективность лазеров, работающих в различных режимах.

Сделанные выводы по оптимизации составов кристаллов и режимов генерации подтверждены в прямых генерационных экспериментах.

Исследованы также процессы взаимодействий возбужденных ионов гольмия ( ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$ ,  ${}^5I_7 \rightarrow {}^5I_6$ ) в кристалле ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$  ( $C_{Ho} = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ), измерена константа нелинейного взаимодействия ионов гольмия ( $5 \cdot 10^{-18} \text{ см}^3/\text{с}$ ), сделаны рекомендации по концентрациям активаторов в данном кристалле с целью создания трехмикронного лазера, работающего на переходе  ${}^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$   $\text{Ho}^{3+}$ . Установлено также, что в кристалле ИСГГ:  $\text{Cr}^{3+}:\text{Tm}^{3+}:\text{Ho}^{3+}$  нелинейные процессы взаимодействия возбужденных ионов гольмия и тулия

( ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  Tm,  ${}^5\text{I}_7 \rightarrow {}^5\text{I}_8$  Ho) при характерных концентрациях активаторов:  $C_{\text{Tm}} = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $C_{\text{Ho}} = 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и характерных для реальных лазеров плотностях импульсной ламповой накачки могут существенно снижать выходные энергетические характеристики двухмикронных гольмиевых лазеров. Выявлены основные стоксовы и антистоксовы механизмы трансформации энергии в данном кристалле.

Авторы благодарны А.Л. Денисову, Е.В. Жарикову и С.П. Калитину, вырастившим и предоставившим для исследований кристаллы гранатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов В. А., Щербakov И. А. В кн. Спектроскопия кристаллов, Л., Наука 1985 с. 21 – 42.
2. Феофилов П. П. В кн. Физика примесных центров в кристаллах, под ред. Т.С. Завта, Таллинн, изд. АН ЭССР, 1972, с. 539 – 563.
3. Жариков Е. В. и др. Квантовая электроника, 13, 973 (1986).
4. Huber G. et al. Topical meeting of tunable solid state lasers, 87, v. 20, Opt. Soc. Am, Washington DC, 1987, p. 18.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 3 января 1989 г.