

Взаимодействие ионов Er^{3+} в кристаллах кальций – ниобий – галлиевого граната, активированных ионами Er^{3+}

А.В.Малов, П.А.Рябочкина, А.В.Попов, Е.В.Большакова

Представлены результаты исследования процессов безызлучательной передачи энергии в кристаллах кальций–ниобий–галлиевого граната (КНГГ), активированных ионами Er^{3+} . Для кристаллов КНГГ: Er с атомной концентрацией эрбия $C_{\text{Er}} = 6\%$ и 11% выявлено наличие кооперативных процессов безызлучательной передачи энергии ионов эрбия ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$; ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$; ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, эффективность которых возрастает при увеличении интенсивности возбуждаемого излучения. Показано, что для кристаллов КНГГ: Er с атомной концентрацией ионов Er^{3+} свыше 1% характерно наличие процесса кросс-релаксации ионов эрбия ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, эффективность которого зависит от их концентрации.

Ключевые слова: кристаллы кальций–ниобий–галлиевого граната, ионы Er^{3+} , кросс-релаксация, кооперативные процессы безызлучательной передачи энергии.

1. Введение

Кристаллы кальций–ниобий–галлиевого граната (КНГГ) характеризуются разупорядоченной кристаллической структурой, вследствие чего полосы поглощения и люминесценции ионов активаторов (Nd^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+}) в них значительно неоднородно уширены. Данный факт обеспечивает интерес к этим кристаллам из-за лучшего согласования полос поглощения ионов активатора со спектром излучения диодов накачки, а также в связи с возможностью получения на их основе перестраиваемой лазерной генерации и реализации генерации в режиме синхронизации мод.

К настоящему времени существует значительное количество работ, в которых представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных и генерационных свойств, а также процессов безызлучательного переноса энергии в кристаллах КНГГ: Nd, КНГГ: Tm, КНГГ: Yb [1–6]. В работах [7–11] содержатся результаты исследования особенностей структуры кристаллов КНГГ: Er, а также определены спектроскопические характеристики, с помощью которых можно оценить генерационные характеристики данного материала. Однако известно, что на параметры лазерной генерации на переходах ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda \sim 3$ мкм) и ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ($\lambda \sim 1.5$ мкм) ионов Er^{3+} в кристаллических матрицах, активированных этими ионами, существенным образом влияют процессы безызлучательного переноса энергии между ними. Авторы работ, представленных в [12], показали, что получение эффективной лазерной генерации на самоограниченном переходе ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+} в кри-

сталлах ИАГ: Er в условиях ламповой накачки возможно только при высоких ($C_{\text{Er}} = 30\%$) атомных концентрациях ионов Er^{3+} , при которых эффективны процессы апконверсии, приводящие к разгрузке нижнего лазерного уровня ${}^4I_{13/2}$. В [12] представлены результаты всестороннего исследования процессов безызлучательной передачи энергии ионов Er^{3+} в кристаллах $(\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x)_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, а также рассмотрено их влияние на формирование инверсной населенности и генерацию на переходе ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов Er^{3+} в лазере на основе данных кристаллов.

В кристаллах КНГГ: Er процессы безызлучательного переноса энергии электронного возбуждения ионов Er^{3+} до настоящего времени не исследовались. В настоящей работе представлены результаты исследования процессов безызлучательной передачи энергии между ионами Er^{3+} в кристаллах КНГГ: Er, полученные из анализа спектров люминесценции с уровней ${}^4S_{3/2}$ и ${}^4F_{9/2}$ в зеленой и красной областях спектра, а также кривых затухания люминесценции с уровней ${}^4I_{11/2}$, ${}^4S_{3/2}$, ${}^4F_{9/2}$ при возбуждении на уровень ${}^4I_{9/2}$ ионов Er^{3+} .

2. Результаты и их обсуждение

Кристаллы КНГГ: Er с атомными концентрациями ионов Er^{3+} , равными 0.1% , 1% , 6% и 11% , были выращены методом Чохральского из расплава. Контроль концентрации осуществлялся с помощью рентгеноспектрального микроанализатора Camebax.

Регистрация спектров люминесценции кристаллов КНГГ: Er с концентрацией $C_{\text{Er}} = 6\%$, обусловленных переходами ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, при $T = 300$ К осуществлялась с помощью автоматизированной установки на базе решеточного монохроматора SP-558. В качестве приемника излучения использовался ФЭУ R-928. Спектры люминесценции возбуждались излучениями второй гармоники Nd: ИАГ-лазера ($\lambda_{\text{ex}} = 532$ нм) и лазерного диода ($\lambda_{\text{ex}} = 813$ нм). Регистрация кривых затухания люминесценции с уровней ${}^4I_{11/2}$ ($\lambda_{\text{mes}} = 970$ нм), ${}^4S_{3/2}$ ($\lambda_{\text{mes}} = 560$ нм), ${}^4F_{9/2}$ ($\lambda_{\text{mes}} = 670$ нм) ионов Er^{3+} про-

А.В.Малов, П.А.Рябочкина, Е.В.Большакова. Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68; e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru
А.В.Попов. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 26 февраля 2010 г., после доработки – 30 марта 2010 г.

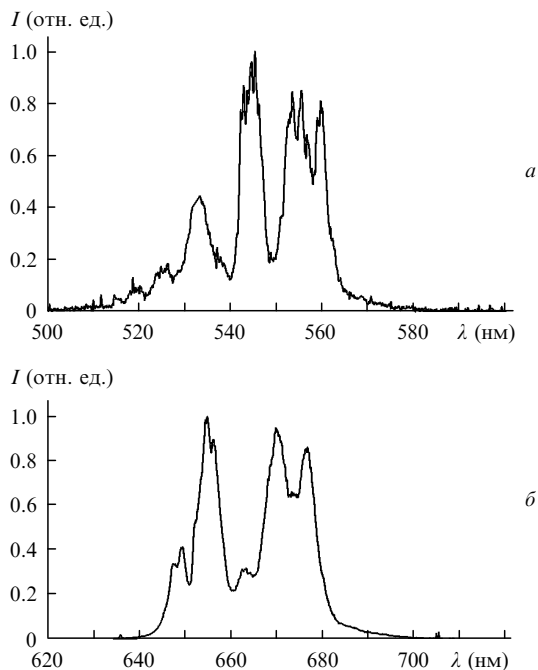


Рис.1. Спектры люминесценции ионов Er^{3+} на переходах ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (а) и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (б) в кристаллах КНГГ:Ег ($C_{\text{Er}} = 6\%$) при $T = 300\text{ К}$ и $\lambda_{\text{ex}} = 532\text{ нм}$.

дилась при их возбуждении на уровень ${}^4\text{I}_{9/2}$ излучением $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера ($\lambda_{\text{ex}} = 791\text{ нм}$) с длительностью импульса 15 нс. В качестве приемников излучения, в зависимости от спектрального диапазона, использовались охлаждаемый ФЭУ-83 и ФЭУ-136.

На рис.1 приведены спектры люминесценции ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег ($C_{\text{Er}} = 6\%$), обусловленные переходами ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и полученные при возбуждении на уровень ${}^4\text{S}_{3/2}$ ионов Er^{3+} излучением второй гармоники Nd:ИАГ-лазера ($\lambda_{\text{ex}} = 532\text{ нм}$). На рис.2 представлены спектры люминесценции ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег ($C_{\text{Er}} = 6\%$), обусловленные

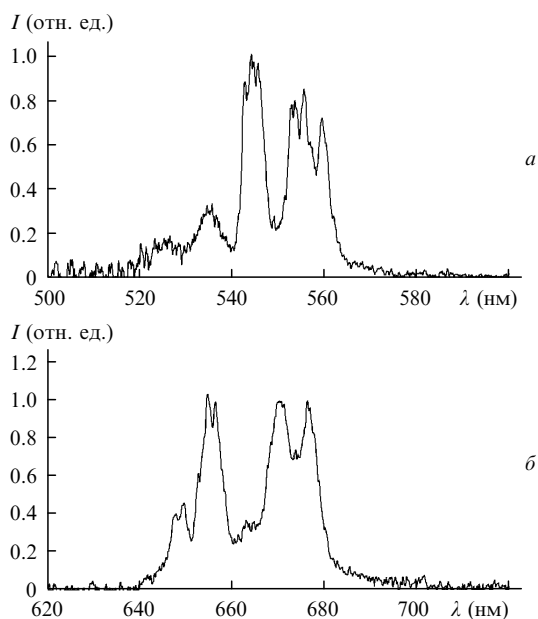


Рис.2. Спектры люминесценции ионов Er^{3+} на переходах ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (а) и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ (б) в кристаллах КНГГ:Ег ($C_{\text{Er}} = 6\%$) при $T = 300\text{ К}$ и $\lambda_{\text{ex}} = 813\text{ нм}$.

теми же переходами, но полученные при возбуждении ионов Er^{3+} на уровень ${}^4\text{I}_{9/2}$ излучением лазерного диода с $\lambda_{\text{ex}} = 813\text{ нм}$.

Для выяснения механизмов заселения уровней ${}^4\text{S}_{3/2}$ и ${}^4\text{F}_{9/2}$ ионов Er^{3+} при втором способе возбуждения нами была исследована кинетика затухания люминесценции с уровней ${}^4\text{I}_{11/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2}$, ${}^4\text{F}_{9/2}$ ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег с концентрациями 0.1%, 1%, 6% и 11% при возбуждении уровня ${}^4\text{I}_{9/2}$ ионов Er^{3+} в этих кристаллах излучением $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера ($\lambda_{\text{ex}} = 791\text{ нм}$). Путем фокусировки излучения этого лазера изменялась плотность энергии возбуждающего излучения лазера.

На рис.3 представлены кривые затухания интенсивности люминесценции с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ для кристаллов КНГГ:Ег с атомными концентрациями 0.1%, 1%, 6% и 11% при возбуждении несфокусированным (рис.3,а) и сфокусированным (фокус линзы, формирующей пучок падающего на исследуемый образец излучения, находился на поверхности образца, установленного в фокальной плоскости коллиматора, который был расположен перед входной щелью монохроматора) (рис.3,б), излучением $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера на уровень ${}^4\text{I}_{9/2}$ ($\lambda_{\text{ex}} = 791\text{ нм}$, $\lambda_{\text{mes}} = 970\text{ нм}$). Видно, что кривые затухания люминесценции с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ для кристаллов КНГГ:Ег с атомными концентрациями 0.1% и 1% в случае как несфокусированного, так и сфокусированного возбуждающих излучений близки к экспоненциальным с характерными временами жизни $\tau = 663$ и 641 мкс соответственно (в кристаллах ИАГ:Ег время жизни с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ иона Er^{3+} составляет 100 мкс [12]). Кривые затухания люминесценции с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ для кристаллов КНГГ:Ег с атомными концентрациями 6% и 11% являются неэкспоненциаль-

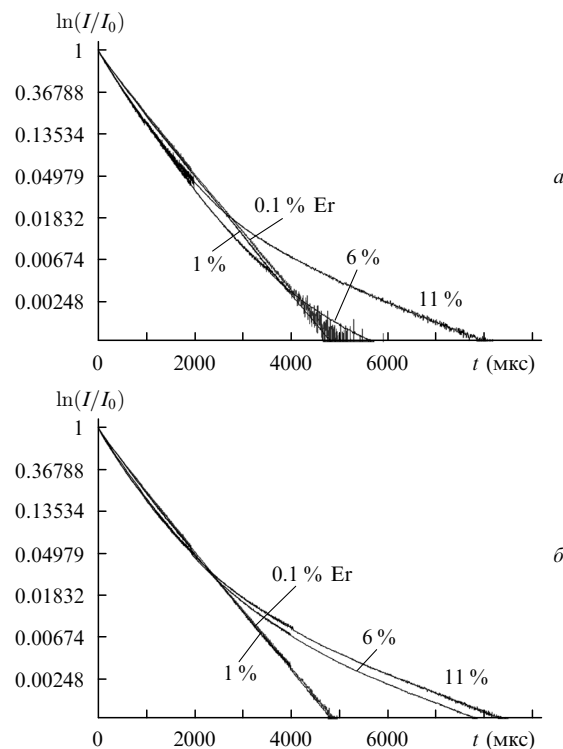


Рис.3. Кривые затухания нормированной интенсивности люминесценции с уровня ${}^4\text{I}_{11/2}$ ($\lambda_{\text{mes}} = 970\text{ нм}$) в кристаллах КНГГ:Ег с различной концентрацией ионов Er^{3+} при возбуждении на уровень ${}^4\text{I}_{9/2}$ ($\lambda_{\text{ex}} = 791\text{ нм}$) излучением $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера: возбуждающее излучение несфокусировано (а), возбуждающее излучение сфокусировано (б).

ными как в первом, так и во втором случае. При этом на кривых затухания люминесценции с уровня $^4\text{I}_{11/2}$ для этих кристаллов с данными концентрациями выделяются две характерные стадии, отличающие их от кривых затухания люминесценции с уровня $^4\text{I}_{11/2}$ для кристаллов КНГГ:Er с атомными концентрациями ионов эрбия 0.1 % и 1 %. В случае несфокусированного возбуждающего излучения для кристалла КНГГ:Er ($C_{\text{Er}} = 6\%$) на первой стадии распада, соответствующей временному интервалу 0–3.6 мс, люминесценция с уровня $^4\text{I}_{11/2}$ затухает быстрее, чем $\exp(-t/\tau)$. На второй стадии, во временной области от 3.6 мс, наблюдается более медленный распад данного уровня по сравнению с законом $\exp(-t/\tau)$, характерным для этих кристаллов с малыми концентрациями Er^{3+} . Из рис.3,а видно, что в случае возбуждения образца КНГГ:Er ($C_{\text{Er}} = 11\%$) несфокусированным излучением $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазера участок на кривой затухания люминесценции с уровня $^4\text{I}_{11/2}$, соответствующий более медленному, чем $\exp(-t/\tau)$, закону распада, увеличивается по сравнению с аналогичным участком, характерным для этого кристалла с концентрацией ионов эрбия 6 %. При сфокусированном возбуждающем излучении в кристаллах КНГГ:Er с концентрациями $C_{\text{Er}} = 6\%$ и 11 % кривые затухания люминесценции ионов Er^{3+} с уровня $^4\text{I}_{11/2}$ также являются двухстадийными. При этом необходимо отметить, что по сравнению со случаем возбуждения несфокусированным излучением на кривой затухания люминесценции ионов Er^{3+} с уровня $^4\text{I}_{11/2}$ для кристалла КНГГ:Er с $C_{\text{Er}} = 6\%$ преобладающим становится более «медленный» участок распада, который в данном случае, так же как и при $C_{\text{Er}} = 11\%$, наблюдается во временной области от 2.5 мс.

На рис.4 и 5 представлены кривые затухания люминесценции с уровней $^4\text{S}_{3/2}$ и $^4\text{F}_{9/2}$ ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Er при возбуждении сфокусированным излучением на уровень $^4\text{I}_{9/2}$. Из анализа кривых затухания люминесценции следует, что время ее «разгорания» с уровней $^4\text{S}_{3/2}$ (~3 мкс) и $^4\text{F}_{9/2}$ (~22 мкс) существенно превышает длительность возбуждающего импульса ($\tau_p \sim 15$ нс). Это позволяет однозначно утверждать, что люминесценция с этих уровней обусловлена не многоступенчатым процессом возбуждения, а кросс-релаксационными переходами с суммированием энергии возбуждения.

Анализ схемы энергетических уровней ионов Er^{3+} (рис.6), а также результатов спектрально-кинетических исследований, описанных выше, позволяет предположить, что за возбуждение люминесценции с уровней

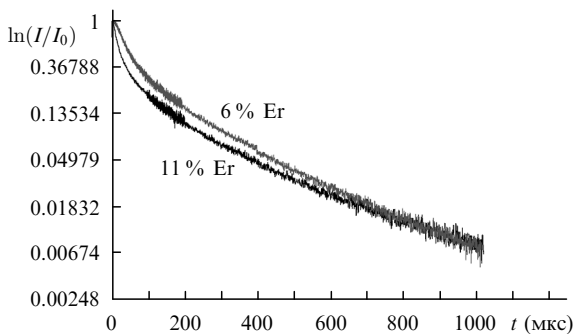


Рис.4. Кривые затухания нормированной интенсивности люминесценции с уровня $^4\text{S}_{3/2}$ ($\lambda_{\text{mes}} = 560$ нм) при возбуждении на уровень $^4\text{I}_{9/2}$ ($\lambda_{\text{ex}} = 791$ нм) для кристаллов КНГГ:Er с концентрациями ионов Er^{3+} 6 % и 11 %.

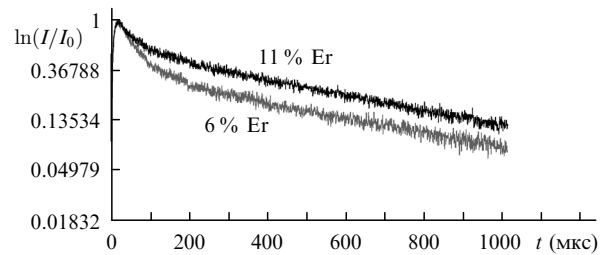


Рис.5. Кривые затухания нормированной интенсивности люминесценции с уровня $^4\text{F}_{9/2}$ ($\lambda_{\text{mes}} = 670$ нм) при возбуждении на уровень $^4\text{I}_{9/2}$ ($\lambda_{\text{ex}} = 791$ нм) для кристаллов КНГГ:Er с концентрациями ионов Er^{3+} 6 % и 11 %.

$^4\text{S}_{3/2}$ и $^4\text{F}_{9/2}$ в кристаллах КНГГ:Er, которая наблюдается при возбуждении более низкого по сравнению с уровнями $^4\text{S}_{3/2}$ и $^4\text{F}_{9/2}$ энергетического уровня $^4\text{I}_{9/2}$, ответственны кооперативные процессы безызлучательной передачи энергии $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$ (на рис.6 отмечены цифрой 1). С уровня $^4\text{F}_{7/2}$ возбуждение безызлучательно релаксирует на уровни $^2\text{H}_{11/2}$, $^4\text{S}_{3/2}$, $^4\text{F}_{9/2}$, с которых затем осуществляется излучательная релаксация на основной уровень $^4\text{I}_{15/2}$. О существовании нелинейного процесса взаимодействия ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Er, соответствующего схеме $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$, свидетельствует наличие более быстрого, чем $\exp(-t/\tau)$, участка на кривой затухания люминесценции с уровня $^4\text{I}_{11/2}$.

Наличие на кривой затухания люминесценции ионов Er^{3+} с уровня $^4\text{I}_{11/2}$ стадии, соответствующей более медленному закону затухания по сравнению с $\exp(-t/\tau)$, обусловлено, вероятно, кросс-релаксацией с уровня $^4\text{S}_{3/2}$ ($^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$) ионов Er^{3+} (на рис.6 обозначена цифрой 2), а также кооперативным процессом безызлучательной передачи энергии с уровня $^4\text{I}_{13/2}$ ($^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$, $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$) (на рис.6 обозначен цифрой 3). В результате этих процессов заселяется уровень $^4\text{I}_{9/2}$, с которого возбуждение безызлучательно релаксирует на уровень $^4\text{I}_{11/2}$, увеличивая его населенность. Эффектив-

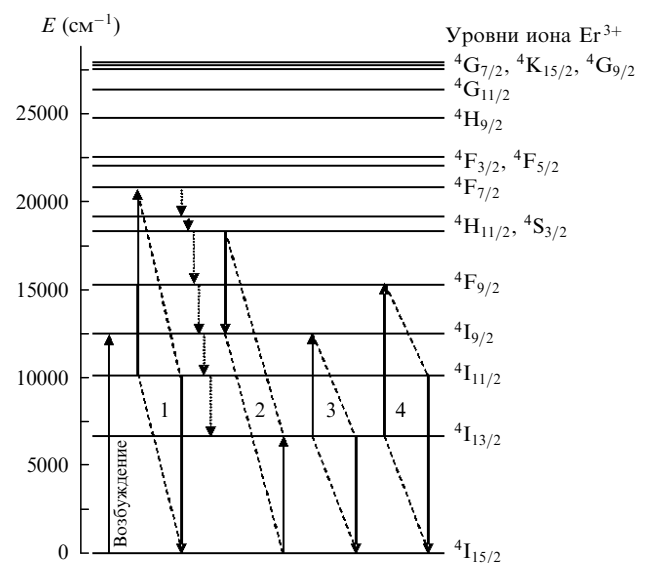


Рис.6. Основные кросс-релаксационные переходы в кристаллах КНГГ:Er: $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (нелинейное взаимодействие, 1), $^4\text{S}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{15/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2}$ (кросс-релаксация, 2), $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$, $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (нелинейное взаимодействие, 3) и $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ (нелинейное взаимодействие, 4).

ность кросс-релаксации с уровня ${}^4S_{3/2}$ (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) возрастает при увеличении концентрации активатора. Об этом свидетельствует тот факт, что участок более «медленного» спада на кривой затухания люминесценции с уровня ${}^4I_{11/2}$ в случае несфокусированного возбуждающего излучения для кристаллов КНГГ:Ег при $C_{\text{Ег}} = 11\%$ соответствует большему временному интервалу, чем при $C_{\text{Ег}} = 6\%$. Наличием кросс-релаксации с уровня ${}^4S_{3/2}$ (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$) и увеличением ее эффективности при росте концентрации ионов Er^{3+} можно объяснить и то, что распад уровня ${}^4S_{3/2}$ ионов Er^{3+} в случае их возбуждения на уровень ${}^4I_{9/2}$ в кристаллах КНГГ:Ег с атомной концентрацией $C_{\text{Ег}} = 11\%$ осуществляется быстрее, чем при $C_{\text{Ег}} = 6\%$ (способы возбуждения аналогичны).

При использовании сфокусированного возбуждающего излучения на уровень ${}^4I_{9/2}$ ионов Er^{3+} увеличивается эффективность кооперативного процесса безызлучательной передачи энергии ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, за счет которого растет населенность уровня ${}^4I_{11/2}$. В случае сфокусированного возбуждающего излучения для кристалла КНГГ:Ег ($C_{\text{Ег}} = 6\%$) это подтверждается увеличением временного интервала, соответствующего «медленной» стадии на кривой затухания люминесценции с уровня ${}^4I_{11/2}$, по сравнению со случаем несфокусированного возбуждающего излучения.

Сравнительный анализ кривых затухания люминесценции с уровня ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в высококонцентрированных кристаллах ИАГ:Ег [12] и КНГГ:Ег ($C_{\text{Ег}} = 6\%$ и 12%), полученных при сфокусированном возбуждающем излучении, свидетельствует об одинаковом характере кривых затухания люминесценции, состоящих из «быстрого» и «медленного» участков спада, и кривых затухания люминесценции с уровня ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в соответствующих кристаллах с малыми концентрациями ионов Er^{3+} . При этом, согласно [12], для динамического диапазона изменения интенсивности $I(t)$, равного двум порядкам в интервале $0-400$ мкс, отношение временных интервалов для участков «быстрого» и «медленного» спадов в кристаллах ИАГ:Ег равно $1:1$. Нами получено, что для кристаллов КНГГ:Ег в случае динамического диапазона изменения интенсивности $I(t)$, равного трем порядкам в интервале $0-8$ мс, отношение временных интервалов для участков «быстрого» и «медленного» спадов равно $1:3$. Этот факт, свидетельствующий об эффективном заселении уровня ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в КНГГ:Ег за счет взаимодействия возбужденных ионов Er^{3+} , а также полученные нами ранее данные о том, что квантовый выход люминесценции с уровня ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в КНГГ:Ег, равный 14% , на порядок больше аналогичной величины в кристаллах ИАГ:Ег [9], позволяют предположить возможность достижения трехмикронной генерации на переходе ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег.

Анализ кривых затухания люминесценции с уровня ${}^4F_{9/2}$ ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег при $C_{\text{Ег}} = 6\%$ и 11% показывает, что с увеличением концентрации Er^{3+} распад уровня ${}^4F_{9/2}$ в случае возбуждения сфокусированным излучением на уровень ${}^4I_{9/2}$ осуществляется медленнее (см. рис.5). По-видимому, это обусловлено нелинейным взаимодействием ионов Er^{3+} (${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$) (на рис.6 обозначено цифрой 4), эффективность которого возрастает при увеличении концентрации ионов Er^{3+} .

3. Заключение

В ходе исследований, проведенных в настоящей работе, показано, что для кристаллов КНГГ:Ег с атомной концентрацией ионов Er^{3+} более 1% характерно наличие кооперативных процессов безызлучательной передачи энергии ионов эрбия ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4F_{7/2}$; ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4F_{9/2}$; ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$. Выявлено также, что на формирование населенности уровня ${}^4I_{11/2}$ влияет процесс кросс-релаксации ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, эффективность которого зависит от концентрации ионов Er^{3+} .

Проведенные исследования позволяют предположить, что для получения генерации на переходе ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ($\lambda_{\text{las}} \sim 1.5$ мкм) ионов Er^{3+} целесообразно использовать кристаллы КНГГ:Ег, концентрации Er^{3+} в которых не превышает 1% . Наличие кросс-релаксации с уровня ${}^4S_{3/2}$ (${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$), а также кооперативного процесса безызлучательной передачи энергии с уровня ${}^4I_{13/2}$ (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$) ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег с концентрацией Er^{3+} более 1% при увеличении плотности излучения, возбуждающего ионы на уровень ${}^4I_{9/2}$, позволяют предположить возможность получения на основе кристаллов КНГГ:Ег генерации на переходе ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda_{\text{las}} \sim 3$ мкм) ионов Er^{3+} . Определение оптимальной концентрации ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег с целью их использования для достижения трехмикронной генерации требует дополнительных исследований, в частности детального изучения процесса кросс-релаксации с уровня ${}^4S_{3/2}$, а также рассмотрения особенностей релаксации энергии уровня ${}^4I_{13/2}$ при различных плотностях возбуждающего излучения уровня ${}^4I_{11/2}$ ионов Er^{3+} в кристаллах КНГГ:Ег с различной концентрацией ионов Er^{3+} .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-02-00055) и Программы поддержки молодых ученых РАН.

1. Каминский А.А., Белоконева Е.Л., Буташин А.В. и др. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы*, **22** (7), 1061 (1986).
2. Воронько Ю.К., Еськов Н.А., Гессен С.Б. и др. *Квантовая электроника*, **17** (3), 307 (1990).
3. Воронько Ю.К., Еськов Н.А., Подставкин А.С. и др. *Квантовая электроника*, **31** (6), 531 (2001).
4. Voronko Yu.K., Sobol A.A., Karasik A.Ya., Eskov N.A., Ryabochkina P.A., Ushakov S.N. *Opt. Mater.*, **20**, 197209 (2002).
5. Воронько Ю.К., Гессен С.Б., Еськов Н.А., Рябочкина П.А., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И. *Квантовая электроника*, **20** (4), 363 (1993).
6. Воронько Ю.К., Попов А.В., Соболев А.А., Ушаков С.Н. *Неорганические материалы*, **42** (10), 1242 (2006).
7. Tsuboi T., Shimamura K., Fukuda T. *Cryst. Phys. Stat. Sol. (b)*, **214** (2), 479 (1999).
8. Малов А.В., Нищев К.Н., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н. *Вестник ННГУ. Сер. Физика твердого тела*, **1** (9), 207 (2006).
9. Воронько Ю.К., Малов А.В., Нищев К.Н., Рябочкина П.А., Соболев А.А., Ушаков С.Н. *Оптика и спектроскопия*, **102** (5), 788 (2007).
10. Белова И.А., Большиков Ф.А., Воронько Ю.К., Малов А.В., Попов А.В., Рябочкина П.А., Соболев А.А., Ушаков С.Н. *ФТТ*, **50** (9), 1552 (2008).
11. Малов А.В., Марычев М.О., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н., Чупрунов Е.В. *Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И.Лобачевского*, № 6, 46 (2008).
12. В сб. *Лазер на кристаллах иттрий-эрбий-алюминиевого граната. Труды ИОФАН* (М.: Наука, 1989, т. 19).