

КВАЗИДВУХУРОВНЕВЫЙ $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ЛАЗЕР 1,6 мкм ДИАПАЗОНА

© 2001 г. М. О. Искандаров; А. А. Никитичев, канд. физ.-мат. наук; А. И. Степанов*, доктор техн. наук

– НИИ лазерной физики, Санкт-Петербург

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"

Изучено взаимодействие ионов Er в возбужденном состоянии $^4I_{13/2}$ в кристаллах YAG . Установлено, что в диапазоне концентраций Er 1–25 ат.% параметр скорости ir -конверсии линейно изменяется от $0,5 \times 10^{-17}$ до $18 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$. Обсуждается влияние ir -конверсии на эффективность $\text{Er}:\text{YAG}$ лазера.

Создан эффективный лазер на кристалле $\text{YAG}:\text{Er}$ (1 ат.%), генерирующий на длине волны 1,64 мкм с продольной накачкой излучением лазера на $\text{Yb}-\text{Er}$ стекле (1,532 мкм). При энергии накачки 55 мДж в режиме свободной генерации получена энергия 15 мДж в режиме модуляции добротности 5 мДж.

Коды OCIS: 140.3500.

Поступила в редакцию 30.05.2001.

Введение

Лазеры полуторамикронного диапазона представляют интерес для дальнометрии и дистанционного зондирования благодаря хорошему пропусканию атмосферы в этом спектральном диапазоне, наличию чувствительных приемников и безопасности полуторамикронного излучения для глаз.

Наиболее распространенным твердотельным лазером 1,5 мкм диапазона является лазер на $\text{Yb}-\text{Er}$ стекле, генерирующий на переходе $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ иона Er^{3+} [1–3]. Интенсивная полоса поглощения ионов Yb в области 0,95 мкм, высокий квантовый выход сенсibilизации и большое время жизни верхнего лазерного уровня (6 мс) в сочетании с полупроводниковой накачкой делают лазеры на $\text{Yb}-\text{Er}$ стекле перспективными наряду с нелинейно-оптическими генераторами излучения полуторамикронного диапазона [4–6].

Однако низкая теплопроводность стеклянной матрицы ограничивает частоту следования импульсов в периодическом режиме работы лазера на уровне единиц герц. Термооптические aberrации и наведенное двулучепреломление в активных элементах приводят к снижению энергии генерации и ухудшению качества излучения.

В кристаллических лазерных материалах сенсibilизация полуторамикронного перехода $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ иона Er ионами Yb малоэффективна [7, 8] из-за значительного времени жизни $^4I_{11/2}$ состояния Er , промежуточного в процессе переноса энергии от ионов Yb к лазерному уровню (около 100 мкс в оксидных кристаллах и более 1 мс во фторидах). При низкой концентрации ионов Er , диктуемой трехуровневым характером лазерного перехода, и высокой концентрации ионов Yb , необходимой для поглощения излучения накачки, большая часть погло-

щенной средней энергии сосредотачивается и релаксирует на ионах Yb .

Среди различных схем накачки полуторамикронного перехода $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ иона Er в кристаллах [9–12] наиболее эффективной является селективная накачка непосредственно верхнего лазерного уровня $^4I_{13/2}$ иона Er . Источником накачки в данном случае могут служить лазерные диоды, излучающие в области 1,48 мкм, а также лазер на $\text{Yb}-\text{Er}$ стекле, работающий в режиме свободной генерации. Квазидвухуровневая схема генерации характеризуется малым стоковым сдвигом, минимизирует тепловыделение в активной среде, что в сочетании с высокой теплопроводностью кристаллических материалов способствует повышению средней мощности и качества лазерного излучения.

В настоящей работе создан эффективный твердотельный лазер на кристалле $\text{YAG}:\text{Er}$ (1 ат.%), генерирующий на длине волны 1,64 мкм с продольной накачкой излучением лазера на $\text{Yb}-\text{Er}$ стекле (1,532 мкм). Изучено взаимодействие ионов Er в возбужденном состоянии $^4I_{13/2}$ в кристаллах YAG . Обсуждается влияние ir -конверсии на эффективность квазидвухуровневого $\text{Er}:\text{YAG}$ лазера.

Рабочая схема активной среды $\text{YAG}:\text{Er}$

Схема преобразования энергии в кристаллах $\text{YAG}:\text{Er}$ показана на рис. 1. Инверсия населенностей уровней лазерного перехода, возникающая в процессе оптической накачки, разрушается в результате излучательного распада уровня $^4I_{13/2}$ и взаимодействия возбужденных ионов Er , протекающего по схеме $(^4I_{13/2}; ^4I_{13/2}) \rightarrow (^4I_{15/2}; ^4I_{9/2})$. Быстрая безызлучательная релаксация возбуждения уровня $^4I_{9/2}$, возникающего в результате ir -конверсии, приводит к заселению уровня $^4I_{11/2}$, основным каналом

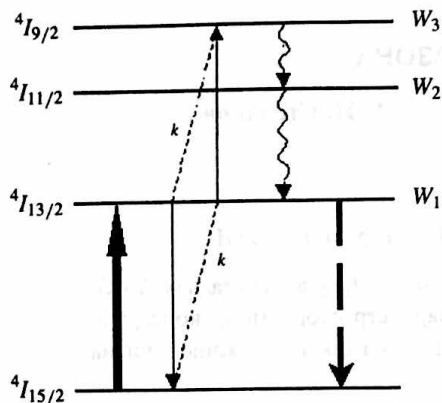


Рис. 1. Схема преобразования энергии в кристалле YAG:Er. Жирной стрелкой показан процесс возбуждения уровня $^4I_{13/2}$, тонкими стрелками показан процесс суммирования возбуждений, волнистыми стрелками показаны процессы безызлучательной релаксации, прерывистая стрелка – процесс генерации.

релаксации которого при низкой концентрации ионов Er также является внутрицентровый безызлучательный распад $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ ($W_2 = 10^4 \text{ с}^{-1}$). Таким образом, каждый акт *up*-конверсии приводит к потере одного кванта возбуждения верхнего лазерного уровня.

Процесс взаимодействия возбужденных ионов Er в кристаллах YAG неоднократно обсуждался в литературе [13–16]. Этот процесс составляет основу рабочей схемы трехмикронного Er:YAG лазера, реализованной в высококонцентрированных кристаллах. Поскольку параметры процесса *up*-конверсии в области низких концентраций активатора в литературе отсутствуют, нами были проведены исследования кинетики возбуждения и релаксации населенности уровня $^4I_{13/2}$ в концентрационной серии кристаллов, содержащих от 1 до 25% Er.

В экспериментах производилась регистрация сигнала люминесценции уровня $^4I_{13/2}$ после интенсивного импульсного возбуждения кристаллов излучением лазера на Yb–Er стекле. Схема установки приведена на рис. 2.

Перестраиваемый лазер на Yb–Er в стекле с ламповой накачкой работал в области 1,532 мкм в

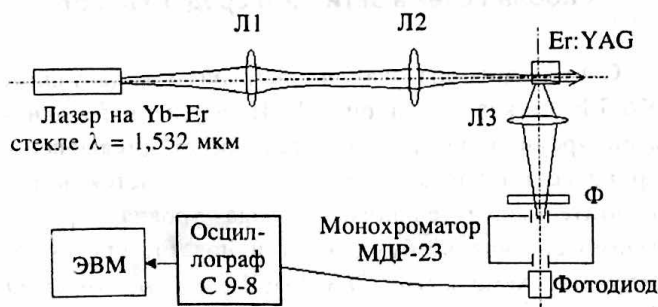


Рис. 2. Схема установки для исследования взаимодействия возбужденных ионов Er^{3+} .

режиме свободной генерации (длительность импульса 0,5 мс, энергия до 120 мДж). Плоскость апертурной диафрагмы лазера накачки ретранслировалась на поверхность образца двухлинзовым ретранслятором Л1, Л2. Диаметр лазерного пучка в образце составлял 1,25 мм. Линза Л3 создавала изображение образца в плоскости входной щели монохроматора. Диафрагма перед входной щелью монохроматора вырезала в образце равномерно возбужденную зону сечением 0,6×0,6 мм, излучение люминесценции которой на длине волны 1,645 мкм выделялось монохроматором МДР-23. Спектральная ширина щелей монохроматора составляла 3,6 нм. На выходе монохроматора сигнал люминесценции принимался германиевым фотодиодом и регистрировался цифровым осциллографом С9-8. Амплитудное разрешение схемы регистрации составляло 2^8 , а временное разрешение – 2^{10} . С осциллографа данные передавались на ЭВМ.

Калибровка сигнала люминесценции в абсолютных значениях населенности уровня $^4I_{13/2}$ осуществлялась путем измерения поглощенной энергии в образцах YAG:Er.

Кинетика релаксации населенности лазерного уровня в кристаллах YAG:Er после импульсного возбуждения описывается системой кинетических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = -n_1 W_1 - 2kn_1^2 + n_2 W_2, \\ \frac{dn_2}{dt} = -n_2 W_2 + kn_1^2, \end{cases}$$

где n_1 и n_2 – населенности уровней $^4I_{13/2}$ и $^4I_{11/2}$ соответственно, W_1 и W_2 – вероятности внутрицентровой релаксации уровней $^4I_{13/2}$ и $^4I_{11/2}$, k – параметр скорости *up*-конверсии.

Вероятность безызлучательной релаксации уровня $^4I_{11/2}$ иона Er в кристаллах YAG составляет 9000 с^{-1} . Время жизни верхнего лазерного уровня в низкоконцентрированных кристаллах YAG:Er составляет 7 мс и уменьшается с ростом концентрации Er в результате концентрационного тушения возбуждения на примесях.

Время жизни уровня $^4I_{13/2}$ измерялось при малой плотности возбуждения образцов, когда взаимодействием возбужденных ионов можно пренебречь. Параметр скорости *up*-конверсии k определялся путем минимизации ошибки описания экспериментально наблюдаемой кинетики системой скоростных уравнений.

На рис. 3 показаны экспериментальная кинетика релаксации населенности уровня $^4I_{13/2}$ иона Er в кристалле YAG:Er (5 ат.%) и ошибка описания наблюдаемой кинетики системой скоростных уравне-

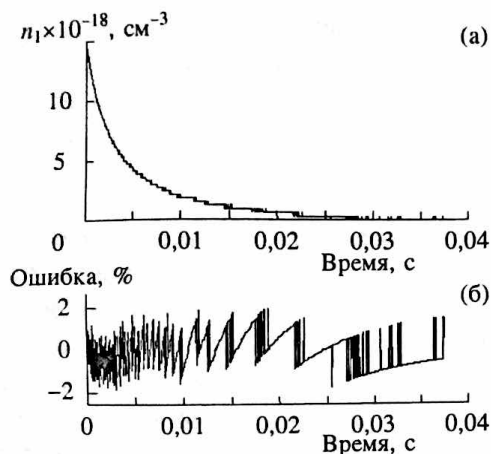


Рис. 3. Экспериментальная кинетика релаксации населенности уровня $^4I_{13/2}$ иона Er в кристалле YAG:Er (5 ат.%) (а) и ошибка описания наблюдаемой кинетики системой скоростных уравнений с параметром $k = 2 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$ (б).

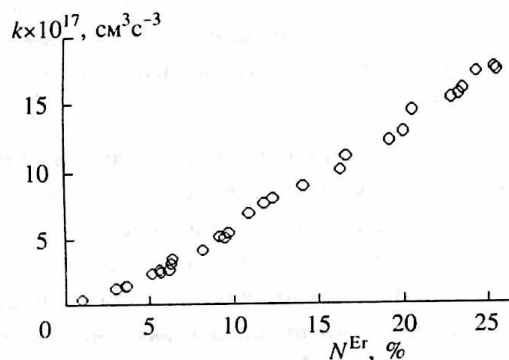


Рис. 4. Зависимость параметра скорости процесса ir -конверсии энергии возбуждения ($^4I_{13/2}; ^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}; ^4I_{9/2}$) в кристаллах YAG:Er от концентрации Er.

ний с параметром $k = 2 \times 10^{-17} \text{ с}^{-1} \text{ см}^3$. Видно, что ошибка кинетического описания процесса взаимодействия возбужденных ионов не превышает 2% и обусловлена главным образом ошибкой дискретизации.

Результаты определения параметра скорости ir -конверсии в концентрационной серии кристаллов Er:YAG показаны на рис. 4. Близкая к линейной зависимость параметра скорости ir -конверсии от концентрации ионов Er указывает на диполь-дипольный механизм межионного взаимодействия.

Полученные данные позволяют оценить влияние ir -конверсии на процесс накопления энергии на верхнем лазерном уровне $^4I_{13/2}$ иона Er. Пороговая населенность уровня $^4I_{13/2}$ составит $[\beta_1/(\beta_1 + \beta_2)]N_0$, где β_1 и β_2 – больцмановские факторы заполнения рабочих штарковских компонентов нижнего $^4I_{15/2}$ и верхнего $^4I_{13/2}$ уровней лазерного перехода, N_0 – концентрация ионов Er. Для линии генерации 1,645 мкм значения β_0 и β_1 при комнатной температуре составляют соответственно 0,021 и 0,21. Таким

образом, пороговая населенность лазерного уровня составляет около 9% от концентрации ионов Er. Например, при концентрации Er 1 ат.% и трехкратном превышении пороговой накачки населенность верхнего лазерного уровня составит $n_1 = 0,4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Вероятность дезактивации верхнего лазерного уровня по ir -конверсионному механизму будет составлять при этих условиях $W_{ir} = n_1 k = 200 \text{ с}^{-1}$ и превысит вероятность излучательного распада уровня $^4I_{13/2}$ ($W_{rad} = 150 \text{ с}^{-1}$). Таким образом, ir -конверсия значительно снижает время накопления энергии на верхнем лазерном уровне, являющееся важным параметром активной среды, особенно при использовании полупроводниковой накачки.

Лазер на кристалле YAG:Er

На рис. 5 представлена оптическая схема YAG:Er лазера. Активный элемент из кристалла YAG:Er (1%) диаметром 5 мм и длиной 5 мм находился у глухого зеркала R_2 полуконфокального резонатора. Торцы активного элемента были просветлены на длину волны 1,64 мкм. Длина резонатора составляла 150 мм. Для модуляции добротности резонатора использовался затвор на основе эффекта нарушения полного внутреннего отражения [3, 17]. Источником накачки служил перестраиваемый лазер на Yb–Er стекле с ламповой накачкой, работающий в режиме свободной генерации (длительность импульса 0,5 мс, энергия до 120 мДж) на длине волны 1,532 мкм. Перестройка длины волны лазера накачки осуществлялась призматическим монохроматором, ширина линии генерации составляла 3 нм. Излучение лазера накачки ретранслировалось в кристалл YAG:Er линзами Л1, Л2 и зеркалом R_3 . Диаметр пучка накачки на активном элементе составлял 1,1 мм. Угол между излучением накачки и осью резонатора составлял $1,5^\circ$. Глухое зеркало резонатора имело коэффициент отражения на длине волны накачки 99%. Коэффициент поглощения излучения накачки в кристалле YAG:Er составлял $0,8 \text{ см}^{-1}$.

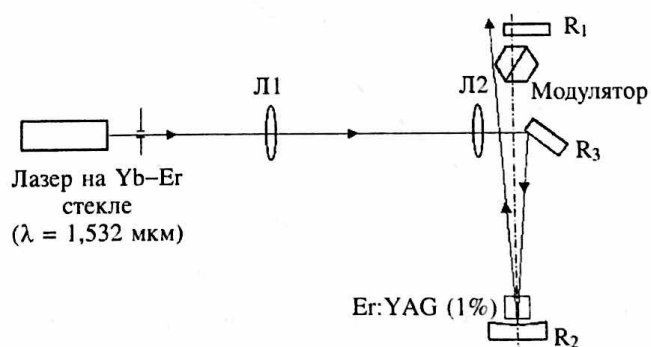


Рис. 5. Оптическая схема YAG:Er лазера.

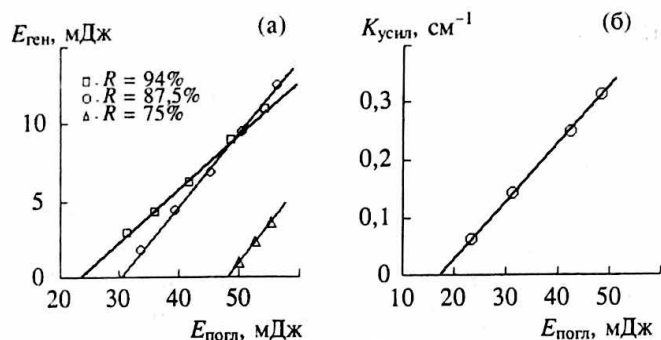


Рис. 6. Зависимости энергии генерации (а) при различных коэффициентах отражения выходного зеркала и коэффициента усиления в кристалле YAG:Er (б) от поглощенной энергии.

На рис. 6а приведены зависимости энергии генерации YAG:Er лазера от поглощенной энергии накачки для различных значений коэффициента отражения выходного зеркала. При коэффициенте отражения выходного зеркала 94% лазер генерировал на длине волны 1,66 мкм, в остальных случаях – на длине волны 1,645 мкм. Дифференциальная эффективность преобразования энергии накачки в энергию свободной генерации YAG:Er лазера составила 52%. Неактивные потери резонатора, найденные из зависимости дифференциальной эффективности от коэффициента связи резонатора, составили 4% на двойной проход резонатора. Основным источником неактивных потерь является, по-видимому, незначительное перекрытие генерирующей моды с непрокачанной (поглощающей) областью в активном элементе.

Зависимость коэффициента усиления в кристалле от поглощенной энергии накачки, найденная путем измерения пороговой энергии накачки при различных значениях потерь резонатора, показана на рис. 6б.

На рис. 7 показаны зависимости энергии моноимпульсной генерации лазера и энергии, запасенной на лазерном переходе, от поглощенной энергии накачки.

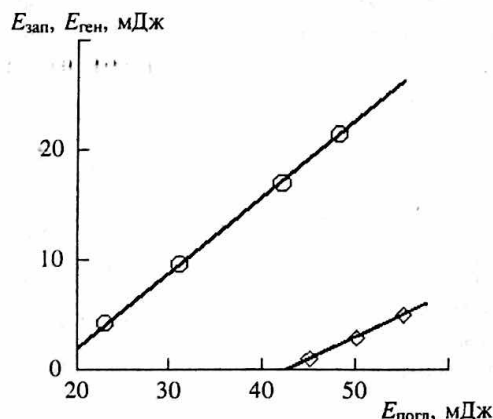


Рис. 7. Зависимости энергии генерации лазера в режиме модуляции добротности (\square) и энергии, запасенной на лазерном переходе (\circ), от поглощенной энергии накачки.

на лазерном переходе, от поглощенной энергии накачки. Коэффициент отражения выходного зеркала при работе лазера в режиме модуляции добротности составлял 80%. Запасенная энергия вычислялась по формуле $E_{зап} = K_{ус} h\nu / [\sigma(\beta_1 + \beta_2)] V$, где $K_{ус}$ – коэффициент усиления, $h\nu$ – энергия кванта генерации, σ – сечение межштарковского перехода, составляющее для линии генерации 1,64 мкм $2,2 \times 10^{-20} \text{ см}^2$; β_1 и β_2 – вероятности заполнения рабочих штарковских компонентов нижнего и верхнего уровней лазерного перехода; V – возбуждаемый объем кристалла, определенный с учетом наклона излучения накачки относительно оси резонатора.

Из рис. 7 видно, что при поглощенной энергии накачки 55 мДж энергия генерации составила 5 мДж. Дифференциальная эффективность накопления энергии в кристаллах YAG:Er составляет 66%. Расчетное значение эффективности энергонакопления, учитывающее стоков сдвиг, некоаксиальность накачки и процессы релаксации возбуждения верхнего лазерного уровня в течение импульса накачки, составляет 70%.

Малый стоков сдвиг в активной среде и высокая теплопроводность кристаллов YAG способствуют повышению средней мощности и качества лазерного излучения. Например, при частоте следования импульсов 20 Гц и поглощенной энергии накачки 60 мДж температурный перепад в активной зоне составит $0,2^\circ$, при этом фокусное расстояние термооптической линзы более 15 м.

Заключение

Изучено взаимодействие ионов Er в возбужденном состоянии $^4I_{13/2}$ в кристаллах YAG. Показано, что влияние ир-конверсии на эффективность накопления энергии может быть минимизировано выбором концентрации ионов активатора в интервале 0,5–1 ат. %.

Создан твердотельный лазер на кристалле YAG:Er, генерирующий на длине волны 1,64 мкм с продольной накачкой излучением лазера на Yb–Er стекле (1,532 мкм). При энергии накачки 55 мДж в режиме свободной генерации получена энергия 15 мДж, в режиме модуляции добротности – 5 мДж. Эффективность накопления энергии в кристаллах YAG:Er составила 66%.

Двухступенчатая схема построения лазера способствует повышению средней мощности и качества выходного излучения. Малый стоков сдвиг и высокая теплопроводность кристаллов минимизируют термооптические искажения в кристалле YAG:Er. Лазер накачки на Yb–Er стекле работает в наиболее эффективном режиме свободной генерации. При ис-

пользовании полупроводниковой накачки эффективность лазеров на Yb-Er стекле в режиме свободной генерации достигает 30%. Требования к качеству излучения накачки в рассматриваемой схеме отсутствуют. Таким образом, двухступенчатая схема построения лазера позволяет обеспечить дифракцион-

ное качество излучения при частотах следования импульсов в десятки герц.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы "Интеграция", проект А 0150 (203) и гранта РФФИ № 98-02-18102.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев Е.Ф., Мурзин С.М., Федоров Ю.К., Фромзель В.А. Особенности создания инверсной населенности на уровне $^4I_{13/2}$ ионов эрбия в иттербий-эрбиевых стеклах // Оптика и спектроскопия. – 1983. – Т. 54, № 2. – С. 265–271.
2. Gapontsev V.P., Matitsin S.M., Isineev A.A., Kravchenko V.B. Erbium glass lasers and their applications // Optics and Laser Technology. – 1982. – Vol. 14, № 4. – P. 189–196.
3. Boutchenkov V., Kuchma I., Levoshkin A. et al. High efficiency diode-pumped Q-switched Yb:Er:Glass lasers // Opt. Commun. – 2000. – Vol. 177. – P. 383–388.
4. Chu Z., Singh U.N., Wilkerson T.D. A self-seeded SRS system for the generation of 1,54 μm eye-safe radiation // Opt. Commun. – 1990. – Vol. 75, № 2. – P. 173–178.
5. Karpukhin S.N. The 1,53- μm Lasing by SRS in Barium Nitrate in Focused Beams and in Resonator // Proc. SPIE. Solid State Lasers. – 2000. – Vol. 4350. – P. 39–49.
6. Naumov V.L., Onischenko A.M., Podstavkin A.S., Shestakov A.V. Miniature optical parametric 1064/1573 nm converter // Proc. SPIE. Solid State Lasers. – 2000. – Vol. 4350. – P. 126–128.
7. Li C., Wyon C., Moncorge R. Spectroscopic properties and fluorescence dynamics of Er^{3+} and Yb^{3+} in Y_2SiO_5 // IEEE J. Quant. Electron. – 1992. – Vol. 28, № 4. – P. 1209–1221.
8. Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V. et al. Fluorescence dynamics, excited-state absorption, and stimulated emission of Er^{3+} in $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ // J. Opt. Soc. Am. B. – 1998. – Vol. 15, № 3. – P. 1205–1212.
9. Stange H., Petermann K., Huber G. Continuous wave 1,6 μm laser in Er doped garnets at room temperature // IEEE J. Quant. Electron. – 1988. – Vol. 24, № 6. – P. 920.
10. Spariosu K., Birnbaum M. Intercavity 1,549- μm pumped 1,634- μm Er:YAG lasers at 300 K // IEEE J. Quant. Electron. – 1994. – Vol. 30, № 4. – P. 1044–1049.
11. Spariosu K., Birnbaum M. Room temperature 1,645 micron Er:YAG lasers // Advanced Solid-State Lasers. Proc. OSA. – Santa Fe, New Mexico, 1992. – P. 127–130.
12. Nikolov S., Wetenkamp L. Diode pumped erbium lasers at 1,55 μm and 1,64 μm in single frequency operation // Proc. SPIE. Laser Optics. – 1995. – Vol. 2772. – P. 78–84.
13. Багдасаров Х.С., Данилов В.П., Жеков В.И. и др. Параметры переноса энергии возбуждения с уровня $^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в кристаллах $(\text{Y}_{1-x}\text{Er}_x)_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ // Квант. электрон. – 1992. – Т. 19, № 4. – С. 376–378.
14. Charlton A., Dickinson M.R., King T.A. High repetition rate, high average power Er:YAG laser at 2,94 μm // J. of Modern Optics. – 1989. – Vol. 36, № 10. – P. 1393–1400.
15. Georgescu S., Lupei V., Glynn T.J., Sherlock R.J. Intensity pump effects in the kinetics of $^4I_{11/2}$ level in ErAG // Opt. Commun. – 1998. – Vol. 155. – P. 61–67.
16. King T.A. Infrared solid-state lasers // Proc. SPIE. High-Power Solid State Lasers and Applications. – 1990. – Vol. 1277. – P. 2–13.
17. Лукьянов А.Л., Сироткин А.А., Фефелов А.П., Хоменко С.И. Моноимпульсный лазер на кристалле $\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$ с НПВО // Тез. докл. Межд. конф. "Оптика лазеров". – 1993. – Т. 1. – С. 58.