

УДК 539.1

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ТРЕХМИКРОННОГО YAG:Er ЛАЗЕРА

В. П. Данилов, В. П. Калинушкин, В. А. Лобачев, В. А. Ночевкин, М. И. Студеникин

*Представлены экспериментальные результаты и расчетные данные исследования температурной зависимости эффективности генерации (КПД) импульсного трехмикронного YAG:Er<sup>3+</sup> лазера (в интервале  $T = -80 - 80^\circ\text{C}$ ). Показано, что понижение температуры лазерного кристалла от комнатной до  $T = -80^\circ\text{C}$  приводит к возрастанию выходной энергии лазера в 3–4 раза при одинаковой энергии ламповой накачки. Соответственно ( $\approx$  в 3 раза) возрастает дифференциальный КПД генерации лазера.*

Многообразие практических применений трехмикронного лазера на кристаллах YAG:Er<sup>3+</sup> определяется уникальным совпадением длины волны генерации этого лазера ( $\lambda = 2.94$  мкм) с пиком поглощения воды. В настоящее время трехмикронный эрбиевый лазер широко применяется в медицине (стоматологии, дерматологии, косметологии, хирургии), биологии и других областях науки и техники.

Для практического использования лазера необходимо совершенствовать его выходные характеристики, искать возможности увеличения выходной энергии импульса генерации лазера и повышения эффективности генерации лазера, т.е. его КПД. Известно, что рабочая температура активных элементов твердотельных лазеров может существенно влиять на их генерационные характеристики [1, 2]. В настоящей работе мы исследовали температурную зависимость эффективности генерации эрбиевого лазера в интервале  $T = -80 - 80^\circ\text{C}$ . Особый интерес представляла область пониженных температур (ниже комнатных), поскольку ранее проведенные нами исследования выявили отрицательное влияние повышенных температур на пороги и эффективность генерации YAG:Er<sup>3+</sup> лазера [1].

В  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазере процессы создания инверсной населенности на трехмикронном переходе между рабочими лазерными уровнями  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$  существенно отличаются от традиционных методов создания инверсии для трехуровневых и четырехуровневых схем. Формирование инверсной населенности на переходе  ${}^4I_{11/2} - {}^4I_{13/2}$  происходит благодаря многочисленным кросс-релаксационным процессам [3, 4], основные из которых изображены на рис. 1. Процессы ион-ионного переноса энергии электронного возбуждения присутствуют практически во всех лазерах на диэлектрических кристаллах, активированных ионами редкоземельных элементов. Однако в высококонцентрированных ( $C \geq 15\%$ ) кристаллах  $\text{YAG:Er}^{3+}$  процессы кросс-релаксации и ап-конверсии являются определяющими при распределении энергии между лазерными уровнями  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$ . На самоограниченном лазерном переходе (время жизни нижнего лазерного уровня  ${}^4I_{13/2}$  более чем на порядок превышает время жизни верхнего лазерного уровня  ${}^4I_{11/2}$  [3]), процессы ап-конверсии с нижнего лазерного уровня (процесс А на рис. 1) снимают самоограничение лазерного перехода, позволяя получать генерацию практически любой длительности вплоть до непрерывной [3]. Многообразию кросс-релаксационных процессов, имеющих место в кристалле  $\text{YAG:Er}^{3+}$  и определяющих генерацию трехмикронного излучения, дало необычное название данному кристаллическому лазеру – “Кросс-релаксационный  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазер” [4]. Следует отметить, что вероятности кросс-релаксационных процессов зависят от температуры кристалла [6] и могут влиять на значения инверсной населенности в активной среде, увеличивая ее или уменьшая.

Для проведения исследований температурной зависимости ( $T = -80 - 80^\circ\text{C}$ ) эффективности генерации лазера использовалась камера тепла и холода КТХ-0.012-60/85, где располагался лазерный излучатель с кристаллом  $\text{YAG:Er}^{3+}$ . Лазерное излучение выходило из камеры через окно, состоящее из двух плоскопараллельных кварцевых пластин. Температура лазерного кристалла поддерживалась постоянной при помощи устройства автоматического поддержания температуры, состоящего из калиброванной термодпары и сосуда Дьюара с испарителем для подачи паров жидкого азота. Измерение выходной энергии генерации производилось стандартным калориметром ИМО-2н.

Накачка активного элемента осуществлялась лампой ИФП-800 в цилиндрическом моноблоке (использовался квантрон К-107). Длительность импульса накачки составляла 700 мкс. Энергия возбуждающего импульса была постоянной при всех температурах и составляла  $E = 300$  Дж. Настройка резонатора производилась с помощью дистанционных манипуляторов, позволяющих изменять углы наклона зеркал с внешней стороны камеры тепла и холода.

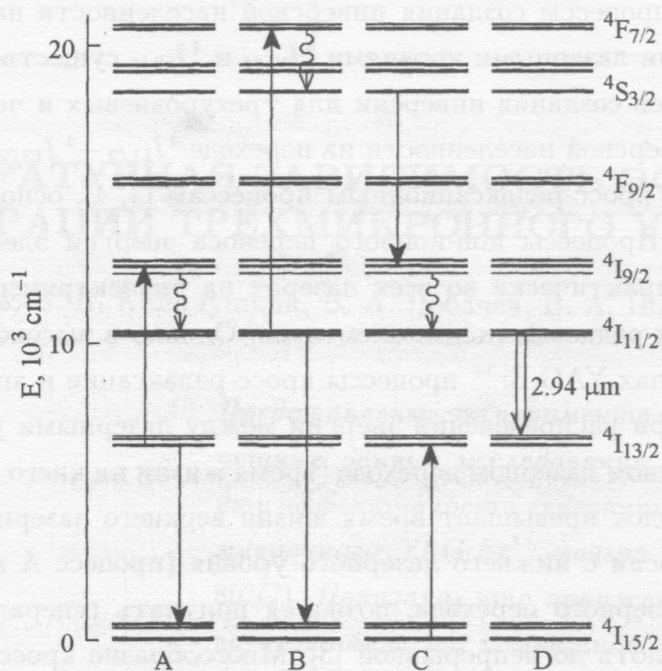


Рис. 1. Основные процессы кросс-релаксации в кристаллах YAG:Er, ответственные за формирование инверсной населенности на трехмикронном переходе  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ .

В работе использовались кристаллы иттрий-алюминиевого граната  $Y_3Al_5O_{12}$ , активированные ионами эрбия  $Er^{3+}$  с концентрацией ионов активатора 50%. Размеры кристалла составляли: диаметр – 6 мм, длина – 120 мм.

На рис. 2 представлена кривая температурной зависимости выходной энергии ( $E$ ) генерации трехмикронного излучения лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами эрбия, при постоянной энергии возбуждения ( $E = 300$  Дж). Видно, что при понижении температуры ниже комнатной ( $T = 20^\circ C$ ) выходная энергия лазера увеличивается вплоть до температуры  $T = -80^\circ C$ , достигая значений  $E \approx 2.8$  Дж, что значительно ( $\approx$  в 2.5 раза) превышает значения выходной энергии лазера при комнатной температуре. Представленные результаты получены при многократных исследованиях одного кристалла, однако подобная зависимость наблюдалась и для других кристаллов YAG:Er $^{3+}$ .

Такое увеличение эффективности генерации YAG:Er $^{3+}$  лазера при понижении температуры активного элемента можно объяснить двумя причинами.

Причина первая: понижение температуры приводит к изменению Больцмановских

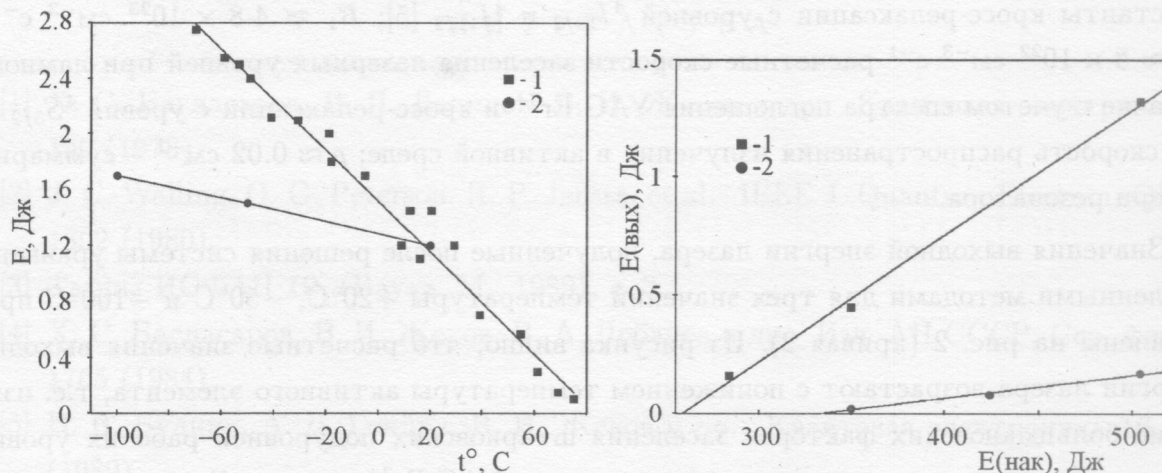


Рис. 2. Температурная зависимость выходной энергии генерации трехмикронного излучения YAG:Er лазера при постоянной энергии ламповой накачки  $E = 300$  Дж. (1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные).

Рис. 3. Зависимость выходной энергии YAG:Er лазера от энергии накачки: 1)  $T = -80^\circ \text{C}$ ; 2)  $T = 20^\circ \text{C}$ .

факторов заселения штарковских подуровней рабочих уровней лазера – мультиплетов  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$ , что в конечном счете может привести к возрастанию инверсной населенности и к увеличению выходной энергии лазера. Для проверки этой гипотезы мы использовали систему уравнений, которая позволяет найти зависимость плотности населенностей уровней рабочего перехода от времени с учетом процессов кросс-релаксации, скорости оптической накачки и плотности потока генерируемого излучения в резонаторе. С учетом вынужденных переходов между штарковскими компонентами мультиплетов  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$  уравнения имеют вид [4]:

$$dN_2/dt = R_1 + R_2 - \sigma S(\alpha N_2 - \beta N_1) - N_2/\tau_2 + W_1(N_1)^2 - W_2(N_2)^2, \quad (1)$$

$$dN_1/dt = R_1 + \sigma S(\alpha N_2 - \beta N_1) - N_1/\tau_1 + N_2/\tau_2 - 2W_1(N_1)^2, \quad (2)$$

$$dS/dt = vS[\sigma(\alpha N_2 - \beta N_1) - \rho], \quad (3)$$

где  $S$  – плотность потока фотонов в резонаторе,  $\sigma = 2.6 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  – сечение лазерного перехода [3];  $\alpha$  и  $\beta$  – болцмановские факторы заселения штарковских подуровней;  $\tau_1 = 1 \text{ мс}$  и  $\tau_2 = 0.1 \text{ мс}$  – времена жизни уровней  $^4I_{13/2}$  и  $^4I_{11/2}$  при концентрации активатора  $C = 50\%$  [3];  $W_1 = 2.5 \times 10^{-16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $W_2 = 7 \times 10^{-16} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  –

константы кросс-релаксации с уровнями  ${}^4I_{13/2}$  и  ${}^4I_{11/2}$  [5];  $R_1 \approx 4.8 \times 10^{23} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $R_2 \approx 5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  расчетные скорости заселения лазерных уровней при ламповой накачке с учетом спектра поглощения  $\text{YAG:Er}^{3+}$  и кросс-релаксации с уровня  ${}^4S_{3/2}$  [5];  $v$  – скорость распространения излучения в активной среде;  $\rho \approx 0.02 \text{ см}^{-1}$  – суммарные потери резонатора.

Значения выходной энергии лазера, полученные после решения системы уравнений численными методами для трех значений температуры  $+20^\circ\text{C}$ ,  $-50^\circ\text{C}$  и  $-100^\circ\text{C}$  представлены на рис. 2 (кривая 2). Из рисунка видно, что расчетные значения выходной энергии лазера возрастают с понижением температуры активного элемента, т.е. изменение бальцовских факторов заселения штатковских подуровней рабочих уровней лазера приводит к увеличению эффективности  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазера. Вместе с тем, как видно из рис. 2, объяснить возрастание экспериментальных значений выходной энергии лазера только за счет изменения бальцовских коэффициентов не удается.

Вторая причина увеличения эффективности генерации  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазера может быть связана со следующим: при понижении температуры происходит сужение линий люминесценции и поглощения трехвалентных ионов эрбия и, одновременно, энергетическое смещение штатковских подуровней [3]. Такое поведение линий люминесценции и поглощения может приводить к изменению интегралов перекрытия и параметров кросс-релаксационных процессов, ответственных за генерационные характеристики  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазера (рис. 1). По всей видимости, при понижении температуры возрастают:

- макропараметры переноса энергии с уровня  ${}^4S_{3/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  (как парные так и трехчастичные процессы передачи энергии [6]), что приводит к более эффективной (с меньшими безызлучательными потерями) доставке энергии возбуждения ламп накачки на рабочие лазерные уровни  ${}^4I_{11/2}$  и  ${}^4I_{13/2}$ ;

- макропараметр ап-конверсии с нижнего лазерного уровня  ${}^4I_{13/2}$ , определяющий кросс-релаксационный механизм генерации  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазера.

Совокупность указанных процессов и приводит к увеличению эффективности генерации  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазера при понижении температуры активного элемента. Дифференциальный КПД лазера возрастает при этом примерно в 3 раза (рис. 3).

В заключение отметим, что результаты настоящей работы могут быть использованы и в случае диодной накачки  $\text{YAG:Er}^{3+}$  лазера, когда селективная накачка значительно снижает тепловую нагрузку на активный элемент по сравнению с ламповой накачкой, создавая тем самым благоприятные условия для использования малогабаритных Пельтье-холодильников.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Х. С. Багдасаров, В. П. Данилов, В. И. Жеков и др. Квантовая электроника **5**, 150 (1978).
- [2] J. C. Walling, O. G. Peterson, H. P. Jense, et al. IEEE J. Quantum Electron. **QE-16**, 1302 (1980).
- [3] Труды ИОФАН **19**, (Наука, М., 1989), с. 3.
- [4] Х. С. Багдасаров, В. И. Жеков, В. А. Лобачев и др. Изв. АН СССР, Сер. физ. **48**, 1765 (1984).
- [5] В. Н. Будник, А. Д. Гондра, В. И. Жеков и др. Квантовая электроника **16**, 1672 (1989).
- [6] М. И. Студеникин. Дис. канд. физ.-мат. наук ИОФРАН, М., 1992.

Институт общей физики

им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 29 декабря 2006 г.