

- [1] Алхазов Г.Д., Берлович Э.Е., Пантелеев В.Н. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 12. С. 1109-1112.
- [2] K i r s c h n e r R. // Nucl. Instr. Meth. 1981. V. 186. P. 275-293.

Поступило в Редакцию
3 марта 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 12

26 июня 1990 г.

07

© 1990

2.7-МИКРОННЫЙ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛАХ $Y_3Al_5O_{12}:Cr, Tm-Er$

Б.М. Антипенко, Л.Е. Долгобородов,
В.А. Письменный, Т.И. Киселева

К трехмикронным эрбиевым лазерам сохраняется устойчивый интерес благодаря идеальному согласованию их спектра генерации с полосами поглощения биотканей и вытекающим отсюда благоприятным перспективам использования этих лазеров в медицине. Наиболее продвинутые в технологическом и исследовательском аспектах эрбиевые лазерные среды: $Y_3Al_5O_{12}-Er$ [1] и $YSGG:Cr-Er$ [2] работают в режиме самоограничения генерации, частично снимаемого процессом суммирования возбуждений $^4I_{13/2}$ - уровня иона Er^{3+} . В данной работе исследована 2.7-микронная эрбиевая (переход $^4I_{11/2} - ^4I_{13/2}$) среда $Y_3Al_5O_{12}:Cr, Tm-Er$ с четырехуровневой схемой генерации. При конструировании среды мы воспользовались предложенным в [3] принципом снятия самоограничения генерации, состоящим в принудительном расселении нижнего рабочего уровня процессом переноса энергии на тушашую примесь, и методом сенсibilизации лазерного перехода. На возможность сенсibilизации трехмикронного канала иона Er^{3+} ионами Cr^{3+} в кристаллах граната указывалось в [4].

Нами исследовались кристаллы $Y_3Al_5O_{12}$, соактивированные ионами Cr^{3+} ($2 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$ по шихте), Tm^{3+} (1 ат.%) и Er^{3+} (15 ат. %). Изучение кинетики энергодвижения в этих кристаллах показало, что время выхода ~ 70 % возбуждений из полос накачки среды $^4A_2 - ^4T_2$, принадлежащим ионам Cr^{3+} , на рабочий

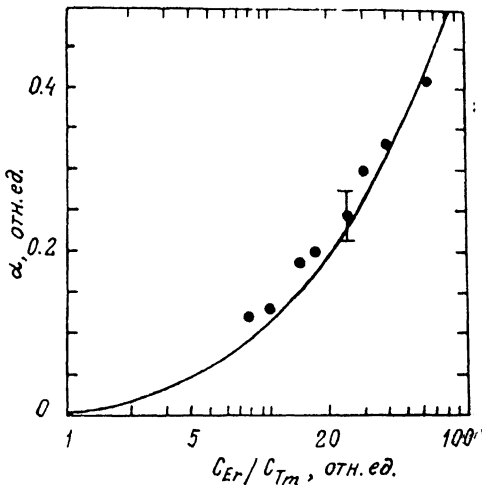


Рис. 1. Функция квазистационарного распределения возбуждений по резонансно взаимодействующим уровням 3F_4 (Tm) и ${}^4I_{13/2}$ (Er) в кристаллах $Y_3Al_5O_{12}:Cr$, $Tm-Er$ ($\alpha = n({}^4I_{13/2}) / (n({}^4I_{13/2}) + n({}^3F_4))$) - доля обобществленных возбуждений, локализующихся на уровне ${}^4I_{13/2}$, C_{Er} и C_{Tm} - концентрации ионов Er^{3+} и Tm^{3+}). Сплошная кривая - расчет в предположении бoльцмановского распределения частиц по штарковским подуровням ${}^4I_{13/2}$ и 3F_4 , точки - данные из эксперимента по селективному возбуждению ${}^4I_{13/2}$ - уровня моноимпульсным излучением 1,5 - микронного эрбиевого лазера.

уровень ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} не превышает 20 нс, время жизни ${}^4I_{11/2}$ - уровня равняется 90 мкс, а характеристическое время установления квазистационарного распределения возбуждений по уровням ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} и 3F_4 иона Tm^{3+} составляет 20 мкс. Благодаря последнему обстоятельству эффективный статистический вес нижнего рабочего уровня ${}^4I_{13/2}$ повышается не менее, чем на порядок (см. рис. 1), причем процесс его расселения может стать „узким горлом“ лишь при пятикратном превышении порога генерации.

На основании отмеченных спектроскопических свойств среды $Y_3Al_5O_{12} : Cr, Tm-Er$ разумно ожидать четырехуровневой кинетики ее генерации. На рис. 2 приведена осциллограмма 2,7-микронной генерации кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Cr, Tm$ (1 ат. %) - Er (15 ат. %) при ламповом возбуждении. Строгая пропорциональность, наблюдаемая между мощностью генерации и мощностью накачки, свидетельствует о четырехуровневом характере лазерного процесса. К другим экспериментальным фактам, подтверждающим это,

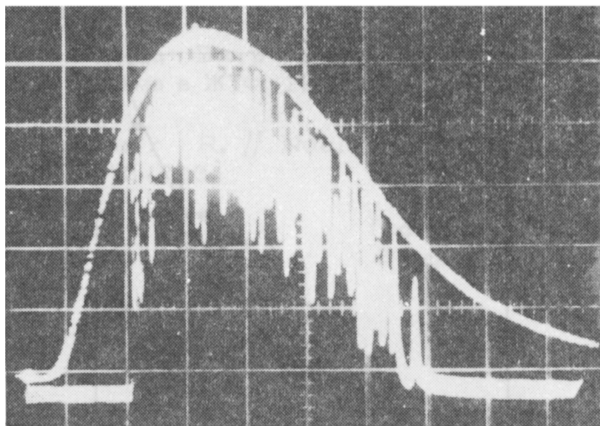


Рис. 2. Оциллограммы 2,7-микронной генерации (внизу) кристалла $Y_3Al_5O_{12} : Cr, Tm$ (1 ат. %) - Er (15 ат. %) и излучения лампы накачки (вверху). Система накачки: цилиндрический моноблок $\varnothing 28 \times 60$ мм из КЛЖ, импульсная лампа ИМП 5/60, хладагент - H_2O , освещиваемый объем активного элемента $\varnothing 4 \times 54$ мм. Резонатор: плоские диэлектрические зеркала с пропусканием $< 0,5\%$ и 15% на линии $2,7$ мкм, длина резонатора 150 мм. Развертка по горизонтали: 20 мкс/дел. Энергия накачки - 75 Дж, энергия генерации 40 мДж.

относится спектральная конденсация генерации в неселективном резонаторе на линии $2,697$ мкм¹ и возможность перестройки длины волны генерации по всему спектру межштарковских переходов между уровнями $^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$.

С помощью дифракционной решетки (максимум ее отражения 80% находился в области 2 мкм) нами получена дискретная перестройка длины волны генерации в диапазоне $2,62-2,94$ мкм с фиксацией на 12-ти линиях - $2,625^H$, $2,655^H$, $2,697$, $2,715^H$, $2,737^H$, $2,798$, $2,807^H$, $2,833$, $2,858^K$, $2,873^H$, $2,902^K$, и $2,940$ мкм, отвечающих максимумам спектра 3-микронной люминесценции кристаллов $Y_3Al_5O_{12} - Er$. [5]. Индексом „н“ отмечены линии генерации, полученные впервые, индексом „к“ - линии, полученные впервые при $T = 300$ К. На линиях $2,697$ и $2,807$ мкм отмечен режим частичной модуляции генерации, обусловленный насыщающимся

¹ Другие линии генерации если и присутствовали в спектре, то они не менее чем в 10^3 раз (аппаратурный предел) слабее линии $2,697$ мкм. Здесь и далее погрешность измерения длины волны генерации составляет $\pm 0,005$ мкм.

потерями резонатора, вносимыми атмосферой.

В заключение оценим предельный КПД 2.7-микронной генерации исследованной среды при использованных нами условиях накачки. КПД четырехуровневого лазера определяется следующей комбинацией сомножителей:

$$\eta = \theta \cdot \frac{\nu_r}{\nu_H} \left(1 - \frac{1}{X}\right) \frac{K_r}{K_r + \rho},$$

где θ - эффективность накачки среды, ν_r/ν_H - стоксов сдвиг, X - превышение над порогом, K_r и ρ - коэффициент связи резонатора и внутррезонаторные потери. Считая теплопроводность кристаллов $Y_3Al_5O_{12}:Cr$, $Tm-Er$ равно теплопроводности $Y_3Al_5O_{12}-Er$ [1], и, измерив квазистационарную тепловую линзу, наводимую в активном элементе, мы оценили значение θ в 7%. В осветителе использовался моноблок из КЛЖ с границей пропускания на 480 нм, поэтому средний квант накачки близок к 17000 см^{-1} . Полагая $X = 5$ и $K_T \gg \rho$, для предельного КПД генерации кристаллов $Y_3Al_5O_{12}:Cr, Tm-Er$ получим значение 1.1% на уровне накачки 40 Дж.²

Дальнейшее увеличение КПД генерации в условиях лампового возбуждения может быть достигнуто, прежде всего, расширением спектра накачки среды за счет включения в него второй полосы поглощения ${}^4A_2-{}^4T_1$ ионов Cr^{3+} . Увеличение КПД может быть получено также переходом к квазистационарным режимам генерации, при которых процесс суммирования возбуждений

$$|{}^4I_{13/2}(Er), {}^3F_4(Tm)\rangle \rightarrow |{}^4I_{9/2}(Er), {}^3H_6(Tm)\rangle$$

начнет эффективно подпитывать лазерный канал энергий, запасенной на накопительных уровнях системы - ${}^4I_{13/2}(Er)$ и ${}^3F_4(Tm)$. Мы обнаружили, что при надпороговых накачках скорость указанного суммирующего процесса в несколько раз превосходит скорость спонтанного распада уровней ${}^4I_{13/2}$ и 3F_4 .

На исследованном кристалле нами реализована частотно-импульсная (3 Гц) генерация с выходной мощностью 0.3 Вт при средней мощности накачки 210 Вт. Низкая эффективность лазера была обусловлена высокими неактивными потерями резонатора ($\rho \approx 0.04 \text{ см}^{-1}$), связанными с поглощением атмосферы на длине волны генерации и отсутствием просветления на торцах активного элемента. Оценка КПД генерации по приведенной выше формуле, используя реальные величины $\theta = 7\%$, $\nu_r/\nu_H = 0.2$, $X = 3, 5$, $K_r/(K_r + \rho) = 0.25$, дает значение 0.25%, близкое к наблюдаемому в эксперименте (0.14%).

² Из рис. 2 следует, что порог генерации составляет ~ 8 Дж, при условии, что длительность импульса накачки короче времени жизни верхнего рабочего уровня.

- [1] Лазер на кристаллах иттрий-эрбий-алюминиевого граната. Труды ИОФАН, т. 19 / Под ред. Т.М. Муриной. М.: Наука, 1989. 152 с.
- [2] Жариков Е.В., Осико В.В., Прохоров А.М., Шербakov И.А. // Изв. АН СССР, Сер. физ. 1984, Т. 48, № 7. С. 1330-1342.
- [3] Johnson L.E., Guggenheim H.J. // IEEE J. Quant. Electron. 1974. V. QE-10. N 4. P.442-449.
- [4] Каминский А.А., Петросян А.Г. // Изв. АН СССР, Сер. неорг. мат. 1979. Т. 15, № 3. С. 543-544.
- [5] Huber G., Duczynski E.W., Mitzscherlich P., Teichmann H.O., Lumma D. // J. Phys. 1987. V. 48. N 12. P. C7-347-C7-349.

Поступило в Редакцию
24 января 1990 г.
В окончательной редакции
25 апреля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 12

26 июня 1990 г.

01; 05.2

© 1990

О ПОРОГЕ ПРОТЕКАНИЯ В ДИСПЕРСНЫХ СМЕСЯХ ПРИ СЖАТИИ

Е.Г. Ф а т е е в

На основе соотношений, связывающих изменение относительной проводимости однофазного пористого тела с давлением при одноосном сжатии, имеющих вид [1]

$$A_i = \Lambda_{i0} B_i = \Lambda_{i0} \frac{\rho_i}{\rho_{i0}} \left[1 - A_i^{2/3} \right] \left[1 + \frac{4}{9} A_i \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где

$$A_i = 1 - \theta_i = 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\rho_i}{\rho_{i0}} \right)^2 \left(-\frac{2}{3} + \sqrt{\frac{4}{9} + 13 \left(\frac{\rho_{i0}}{\rho_i} \right)^2} \right),$$

исследуется зависимость порога протекания обобщенного тока в многокомпонентных дисперсных смесях при сжатии. Здесь Λ_i и Λ_{i0} — обобщенные проводимости i -тых фаз дисперсной смеси в про-