

# Физическая аппаратура

УДК 535.8:621.373.8

## Частотно-ваттная характеристика импульсного твердотельного лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности резонатора

А. Ф. Шаталов, Ф. А. Шаталов

*Исследована частотно-ваттная характеристика импульсного твердотельного лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности резонатора, отражающая зависимость частоты импульсов генерации лазера от поглощенной мощности накачки. В качестве активного элемента лазера использовались кристаллы  $YAG:Nd^{3+}$  и  $CGGG:Nd^{3+}$ , а в качестве пассивного модулятора — кристалл  $YAG:Cr^{4+}$ .*

PACS: 42.55.Xi, 42.55.Rz, 42.60.Gd

*Ключевые слова:* твердотельные лазеры, диодная накачка, пассивная модуляция добротности.

### Введение

При использовании импульсных твердотельных лазеров (ТТЛ) с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности резонатора в робототехнике, датчиках перемещений, задающих генераторах, когерентных оптических радарах и системах синхронизации [1] представляет интерес их частотно-ваттная характеристика  $F(P)$ , отражающая зависимость частоты  $F$  импульсов генерации лазера от поглощенной мощности  $P$  диодной накачки.

В работе [2] показана возможность определения по характеристике  $F(P)$  стабильности частоты  $F$  и порога генерации такого ТТЛ.

В настоящей работе исследованы характеристика  $F(P)$  ТТЛ на кристаллах  $YAG:Nd^{3+}$  и  $CGGG:Nd^{3+}$  с пассивным модулятором (ПМ) на кристалле  $YAG:Cr^{4+}$  в резонаторе, а также чувствительность  $K_F = \frac{\Delta F}{\Delta P}$  частоты  $F$  импульсов генерации лазера к изменениям мощности  $P$  диодной накачки.

### Теория

Работа ТТЛ с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности резонатора описывается уравнениями, приведенными в [3, 4]

**Шаталов Андрей Федорович**, научный сотрудник.

**Шаталов Федор Алексеевич**, доцент.

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет).

Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

Тел. (495) 434-76-74. E-mail: afshatalov@yahoo.co.uk

Статья поступила в редакцию 16 мая 2010 г.

© Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А., 2010

$$\frac{d\phi}{dt} = [2\sigma nd - 2\sigma_s n_s d_s - 2\sigma_{es} n_{es} d_s - \ln(1/R) - L] \frac{\phi}{t_r}; \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = n_p - \frac{n}{\tau} - \gamma\sigma c\phi n, \quad \frac{dn_s}{dt} = \frac{n_{es}}{\tau_{es}} - \gamma_s \sigma_s c\phi n_s \frac{S}{S_s}, \quad (2)$$

$$n_s + n_{es} = n_{0s},$$

где  $\phi$  — плотность фотонов в резонаторе;

$n$  и  $\sigma$  — плотность инверсной населенности и эффективное сечение индуцированных переходов активного элемента (АЭ);

$n_s$  и  $\sigma_s$  — плотность населенности и сечение поглощения нижнего уровня ПМ,  $n_{es}$  и ПМ;

$d$  и  $d_s$  — толщины АЭ и ПМ;

$\gamma$  и  $\gamma_s$  — коэффициенты вырождения инверсии в АЭ и ПМ;

$\tau$  — радиационное время жизни верхнего лазерного уровня АЭ;

$\tau_{es}$  — время жизни возбужденного уровня ПМ;

$R$  — отражательная способность зеркал;

$L$  — пассивные потери при полном проходе светом длины резонатора (исключая потери в ПМ);

$t_r = 2l'/c$  — время полного прохода излучения длины резонатора;

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме;

$l'$  — оптическая длина резонатора лазера;

$S$  и  $S_s$  — эффективные площади поперечного сечения лазерного пучка в АЭ и ПМ.

Используя (1) и (2) аналогично [5, 6], получим следующие выражения для плотности  $n_i$  инверсной населенности АЭ в момент начала генерации

лазера

$$n_i = \frac{2\sigma_s n_{si} d_s + \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L}{2\sigma d}, \quad (3)$$

и для характерного времени  $T_0$  [5, 6]

$$T_0 = \tau \ln\left(\frac{x_p - x_0}{x_p - 1}\right), \quad (4)$$

где  $n_{si}$  — плотность населенности нижнего уровня ПМ в момент начала генерации;

$n_p \cdot \tau = P/k$ ,  $k$  — коэффициент пропорциональности;

$n_i = P_i/k$ ,  $P_i$  — пороговая мощность накачки, соответствующая плотности  $n_i$ .

Время  $T_0$  равно задержке начала генерации лазера относительно переднего фронта импульса накачки в двух случаях — при накачке лазера короткими мощными импульсами, когда за время между импульсами накачки нижний мультиплет АЭ релаксирует в нижнее состояние ( $x_0 = 0$  в (4)), и при преднакачке ТТЛ постоянной мощностью  $P_0 < P_i$  ( $x_0 = P_0/P_i$  в (4)) [5, 6]. Накачка лазера постоянной мощностью  $P > P_i$  соответствует третьему случаю. В этом случае время  $T_0$  равно периоду  $T$  импульсов генерации лазера ( $T_0 = T = 1/F$ ), а параметр  $x_0$  в (4) равен  $n_f/n_i$ , где  $n_f = (f_b n_i + f_a n_e)/\gamma$  — конечная инверсная населенность [3, 5];

$n_e$  — плотность инверсной населенности АЭ в момент окончания импульса генерации лазера;

$\gamma = f_a + f_b$ , а  $f_a$  и  $f_b$  — вероятности Максвелла-Больцмана для верхнего и нижнего энергетических уровней мультиплетов [3].

Возрастание инверсной плотности в АЭ с  $n_e$  до  $n_f$  происходит после окончания импульса генерации за время, пренебрежимое по сравнению с периодом  $T = 1/F$  следования импульсов и обусловлено термализацией энергетических уровней мультиплетов АЭ [3]. Плотность  $n_e$  определяется численным решением уравнения [3, 4]

$$n_i - n_e - \frac{2\sigma_{es} n_{si} d_s + \ln(1/R) + L}{2\sigma d} \ln \frac{n_i}{n_e} - (1-\beta) n_{si} \frac{d_s \gamma S}{d \cdot \gamma_s \cdot S_s} \left[ 1 - \left(\frac{n_e}{n_i}\right)^\alpha \right] = 0,$$

где  $\beta = \frac{\sigma_{es}}{\sigma_s}$ ,  $\alpha = \frac{S \cdot \gamma_s \cdot \sigma_s}{S_s \cdot \gamma \cdot \sigma}$ .

Учитывая изложенное, запишем частотно-ваттную характеристику  $F(P)$  ТТЛ в виде

$$F = \frac{1}{\tau} \left[ \ln \frac{(P/P_i) - x_0}{(P/P_i) - 1} \right]^{-1}, \quad (5)$$

где параметр  $x_0 = \frac{n_f}{n_i}$ .

Так как постоянная  $\tau$  зависит от резонатора ТТЛ и может существенно уменьшаться вследствие усиления последним спонтанного излучения [5], то при оценках частоты  $F$  удобно пользоваться нормированной частотой

$$F_0 = \left[ \ln \frac{x_p - x_0}{x_p - 1} \right]^{-1}. \quad (6)$$

На рис. 1 показана зависимость нормированной частоты  $F_0$  от  $x_p$  при  $x_0 = 0,0; 0,1; 0,2; 0,5; 0,7$ . Из данных этого рисунка следует, что характеристика  $F(P) = F_0(P)/\tau$  ТТЛ сильно зависит от параметра  $x_0$ , который, в свою очередь, через  $n_f$  определяется особенностями энергетических уровней мультиплетов ЛЭ.

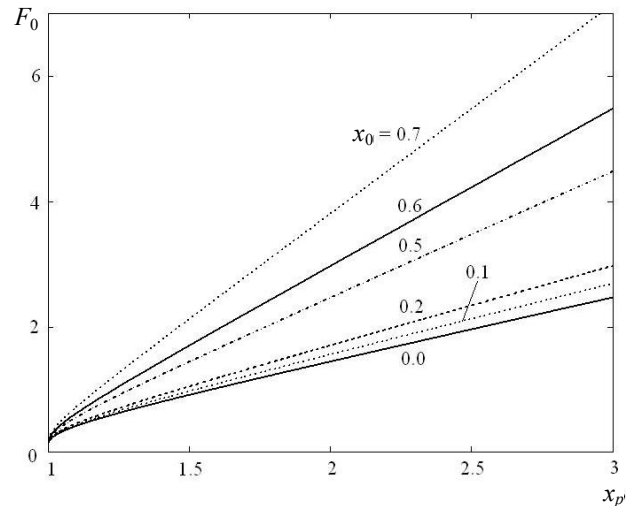


Рис. 1. Зависимость нормированной частоты  $F_0$  от  $x_p$  при  $x_0 = 0,0; 0,1; 0,2; 0,5$  и  $0,7$

Используя линейное приближение для характеристики  $F(P)$ , легко получить выражение для чувствительности  $K_F = \frac{\Delta F}{\Delta P}$  частоты  $F$  импульсов генерации ТТЛ к изменениям  $\Delta P$  мощности  $P$  диодной накачки, где изменение  $\Delta F$  частоты  $F$  обусловлено изменением  $\Delta P$

$$K_F = [\tau(1-x_0)P_i]^{-1}. \quad (7)$$

Коэффициент  $K_F$  равен тангенсу угла наклона линейного участка частотно-ваттной характеристики  $F(P)$ .

### Эксперимент

Схема экспериментальной установки для исследования частотно-ваттной характеристики  $F(P)$

ТТЛ с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности резонатора показана на рис. 2. Источник тока 1 модулировал выходную мощность лазерного диода накачки 2 ( $\lambda_p = 805$  нм,  $\Delta\lambda = 2$  нм) с оптоволоконным выходом 3 ( $r_c = 50$  мкм,  $NA = 0,22$ ). С выхода торца волокна 3 излучение накачки фокусировалось микрообъективом 4 на АЭ 5 в пятно радиусом 45 мкм. АЭ крепился термопастой на медном теплоотводе. Передняя грань АЭ (зачерненный прямоугольник на рис. 2) служила входным зеркалом, а сферическое зеркало 7 (радиус 5 см и коэффициент пропускания 0,01) — выходным зеркалом резонатора лазера. В качестве АЭ использовались кристаллы  $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$  (YAG:Nd<sup>3+</sup>) толщиной 4,1 мм, с концентрацией ионов  $Nd^{3+}$   $0,8 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> и  $Ca_3Ga_2Ge_3O_{12}:Nd^{3+}$  (CGGG:Nd<sup>3+</sup>) толщиной 1,5 мм, с концентрацией  $Nd^{3+}$   $2,0 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

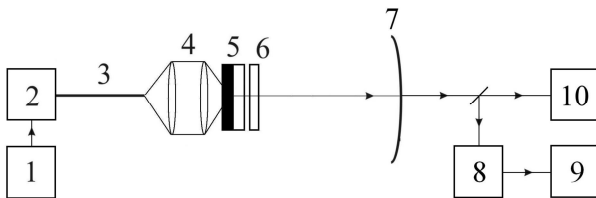


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Поглощение излучения накачки в обоих АЭ было приблизительно одинаковым и составляло ~80 %. Помещенный в резонатор ПМ 6, выполненный на кристалле YAG:Cr<sup>4+</sup> толщиной 1 мм, был просветлен на длине волны 1,06 мкм и имел при малых интенсивностях падающего на него излучения коэффициент пропускания 0,9. Временные параметры импульсов генерации ТТЛ измерялись фотоприемником 8 и осциллографом 9, а мощностные и энергетические — измерителем мощности 10. Длительность, энергия и пиковая мощность импульсов генерации составляли 15 нс, 2,1 мкДж и 0,14 кВт для ТТЛ на кристалле YAG:Nd<sup>3+</sup>, и 11 нс, 3,5 мкДж и 0,32 кВт, соответственно, для ТТЛ на кристалле CGGG:Nd<sup>3+</sup>.

На рис. 3 и 4 показаны частотно-ваттные характеристики ТТЛ с АЭ на кристаллах YAG:Nd<sup>3+</sup> и CGGG:Nd<sup>3+</sup>, соответственно. Сплошные кривые на рис. 3 и 4 рассчитывались по формуле (5) при  $\tau = 114$  мкс [7], точки соответствуют эксперименту, а прямая  $F = K_F(P - P_F)$  соответствует линейному участку характеристики  $F(P)$  (вне линейного участка характеристики  $F(P)$  эта прямая обозначена на рис. 3 и 4 штрихом). По нулевой частоте  $F$  прямой  $F = K_F(P - P_F)$  определяется в соответствии со стандартной методикой порог  $P_F$  генерации

такого ТТЛ [2], а коэффициент  $K_F$ , равный тангенсу угла наклона линейного участка характеристики  $F(P)$ , определяет чувствительность частоты  $F$  к изменениям мощности  $P$ . Пороговая мощность  $P_i$  (начало сплошной кривой на рис. 3 и 4 при  $F = 0$ ) соответствует инверсной населенности  $n_i$  АЭ.

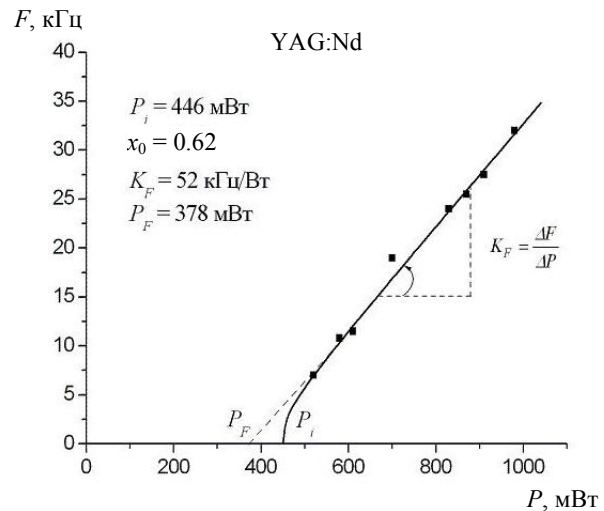


Рис. 3. Частотно-ваттные характеристики  $F(P)$  ТТЛ с АЭ на кристалле YAG:Nd<sup>3+</sup>

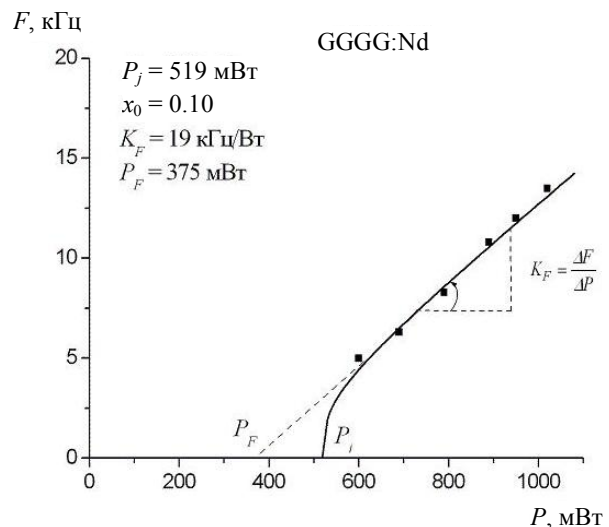


Рис. 4. Частотно-ваттные характеристики  $F(P)$  ТТЛ с АЭ на кристалле CGGG:Nd<sup>3+</sup>

Полученные данные показывают, что у лазера на кристалле YAG:Nd<sup>3+</sup> чувствительность ( $K_F = 52$  кГц/Вт) приблизительно в три раза больше, чем у лазера на кристалле CGGG:Nd<sup>3+</sup> ( $K_F = 19$  кГц/Вт), а порог  $P_i$  у обоих лазеров превышает соответствующий порог  $P_F$ . Последнее обстоятельство объясняется существенной нелинейностью характеристики  $F(P)$  на начальном ее участке, когда мощность  $P$  незначительно превышает порог  $P_i$ . Так как пороги  $P_i$  лазеров ( $P_i = 446$  мВт для

YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера и 375 мВт — для CGGG:Nd<sup>3+</sup>-лазера) так же, как и известные постоянные  $\tau$  кристаллов YAG:Nd<sup>3+</sup> и CGGG:Nd<sup>3+</sup>, отличаются незначительно, то существенное отличие коэффициентов  $K_F$  можно объяснить отличием параметра  $x_0 = n/n_i$  ( $x_0 = 0,62$  для YAG:Nd<sup>3+</sup> и  $x_0 = 0,10$  — для CGGG:Nd<sup>3+</sup>). Очевидно, что порог  $P_i$  лазера всегда превышает порог  $P_F$ , также как и инверсная населенность  $n_i$  АЭ всегда превышает инверсную плотность АЭ, при которой импульс генерации лазера имеет максимальную мощность  $\left(\frac{d\varphi}{dn} = 0\right)$  [3].

### Заключение

Теоретически и экспериментально исследована частотно-ваттная характеристика импульсного твердотельного лазера с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности резонатора, отражающая зависимость частоты  $F$  импульсов генерации лазера от поглощенной мощности  $P$  накачки. Получено выражение для оценки чувствительности  $K_F$  частоты  $F$  к изменениям мощности  $P$ . У лазера на кристалле YAG:Nd<sup>3+</sup> чувствительность  $K_F$  составляла 52 кГц/Вт и была приблизительно в три раза больше, чем у лазера на кристалле CGGG:Nd<sup>3+</sup> (19 кГц/Вт), а порог  $P_i$  ге-

нерации лазеров, соответствующий инверсной плотности  $n_i$  активного элемента в момент начала генерации лазера, превышал порог  $P_F$ , измеренный по стандартной методике.

Авторы благодарят Л. Д. Алексеевского, В. В. Беликова и В. А. Лебедева за обсуждение результатов работы.

Работа поддержана грантами РФФИ 07-02-01488-а, Рособразования 2.1.1/473 и государственным контрактом № 5622р/8061.

### Литература

1. Lai N. D., Brunel M., Bretenaker F., Floch A. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. No. 8. P. 1073.
2. Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А. // ПТЭ. 2009. № 6. С. 24.
3. Degnan J. J. // IEEE J. of Quant. Electron. 1995, V. 31. No. 11. P. 1890.
4. Agnesi A., Acqua S. D., Morello C., Piccino G., Reali C. G., Sun Z. // IEEE J. of Selected Topics in Quant. Electron. 1997. V. 3. No. 1. P. 45.
5. Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А. // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. № 2. С. 315.
6. Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А. // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 337.
7. Шаталов А. Ф., Шаталов Ф. А. // Метрология. 2009. № 7. С. 34.

## Pulse rate-pump power characteristic of diode pumped passively Q-switched solid-state laser

A. F. Shatalov, F. A. Shatalov

Moscow State Institute of Radioengineering, Electronics and Automation  
(Technical University), Moscow, Russia  
E-mail: afshatalov@yahoo.co.uk

*The pulse rate-pump power characteristic of the diode-pumped passively Q-switched solid-state laser is investigated that is the dependence of pulse repetition rates on absorbed pump power. YAG:Nd<sup>3+</sup> and CGGG:Nd<sup>3+</sup> crystals are used as laser elements and YAG:Cr<sup>4+</sup> crystal is used as passive modulator.*

PACS: 42.55.Xi, 42.55.Rz, 42.60.Gd

Keywords: solid-state lasers, diode pumping, passive Q-switching.

Bibliography — 7 references.

Received May 16, 2010