

Исследование динамики лазерной генерации в лабораторном практикуме по квантовой радиофизике

О. П. Дуль, В. М. Стецик, А. В. Баркова, А. А. Афоненко

Белорусский государственный университет, Минск;

e-mail: olgadul@bsu.by

Разработана лабораторная работа по изучению режима свободной генерации и генерации гигантских импульсов в твердотельном YAG: Nd³⁺ лазере. Студентам предлагается ознакомиться с динамическими режимами лазера и с методикой определения внутренних параметров лазера по его временным характеристикам в режимах свободной генерации и активной модуляции добротности. Предлагаемая методика позволяет определить время жизни верхнего лазерного уровня, время жизни фотонов в резонаторе, вероятность вынужденного излучательного перехода в расчете на один фотон, пороговое значение инверсной населенности, получить зависимость максимальной инверсной населенности от энергии накачки. Выполнение работы позволяет студентам получить необходимые знания о лазерной генерации, а также приобрести навыки работы со специализированным оборудованием и программным обеспечением.

Ключевые слова: балансные уравнения, время жизни фотона в резонаторе, релаксационные колебания, активная модуляция добротности, инверсная населенность.

Твердотельные лазеры получили широкое применение в различных областях промышленности, науки, медицины, поэтому практическому изучению их свойств в курсе квантовой радиофизики уделяется особое внимание. Как правило, в работах акцент делается на изучении мощностных характеристик в различных режимах работы [1–3], когда измеряется мощность или энергия лазерного излучения, находится КПД лазера. В предложенной работе студентам предлагается детально исследовать временные характеристики лазера, а также на основе оригинальной методики определить его внутренние параметры.

Теоретическая часть работы построена на анализе балансных уравнений для инверсной населенности (1) и числа фотонов (2):

$$\frac{dn}{dt} = W_p(n_t - n) - \frac{n}{\tau} - Bns; \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dt} = Bns - \frac{s}{\tau_{ph}}, \quad (2)$$

где $W_p(n_t - n)$ определяет скорость накачки; n/τ – скорость уменьшения инверсной населенности за счет безызлучательных и спонтанных переходов (τ – время жизни верхнего лазерного уровня); Bns – уменьшение инверсной населенности при вынужденных излучательных переходах (τ_{ph} – время жизни фотонов в резонаторе).

Динамику переходного процесса можно анализировать в режиме малых отклонений от положения равновесия, представив решение системы уравнений (1) и (2) в виде:

$$n(t) = n_0 + \delta n(t), \quad s(t) = s_0 + \delta s(t). \quad (3)$$

Учитывая, что $\delta n \ll n_0$, $\delta s \ll s_0$, и пренебрегая членами второго порядка малости, содержащими произведение $(\delta n \cdot \delta s)$, из (1) и (2) получаем:

$$\frac{d\delta n}{dt} = -\left(W_p + \frac{1}{\tau}\right)\delta n - B(s_0\delta n + n_0\delta s), \quad (4)$$

$$\frac{d\delta s}{dt} = Bs_0\delta n. \quad (5)$$

Вычисляя производную по времени от выражения (6) и подставляя (4) в (5), получаем для δs дифференциальное уравнение второй степени:

$$\frac{d^2\delta s}{dt^2} + \left(W_p + \frac{1}{\tau} + Bs_0\right)\frac{d\delta s}{dt} + B^2n_0s_0\delta s = 0, \quad (6)$$

решение которого ищем в виде произведения $\delta s = \delta s_0 \cdot \exp(at)$. Подставляя δs в (6), для параметра a получаем квадратное уравнение $a^2 + 2\gamma a + \Omega_r^2 = 0$, где коэффициент $\gamma = 0,5(W + 1/\tau + Bs_0)$ характеризует затухание; $\Omega_r^2 = B^2n_0s_0 = Bs_0/\tau_{ph}$ – частота релаксационных пульсаций.

Исследуя работу лазера в режиме свободной генерации, можно определить время жизни верхнего лазерного уровня τ как функцию времени задержки излучения t_d по наклону графика зависимости $t_d(\ln[E/(E - E_{th})])$:

$$\tau = \Delta t_d / \Delta \ln \frac{E}{E - E_{th}}. \quad (7)$$

Здесь E – энергия накачки, E_{th} – пороговая энергия накачки.

Взаимосвязь между квадратом частоты релаксационных пульсаций и вероятностью вынужденного излучательного перехода в расчете на один фотон B можно представить выражением:

$$\Omega_r^2 = \frac{Bs_0}{\tau_{ph}} = B \frac{P_{out}}{\hbar\omega}. \quad (8)$$

Так как импульс накачки не является строго прямоугольным, а лазер работает в многомодовом режиме, промежутки времени T между последовательными релаксационными импульсами излучения значительно варьируются. Поэтому для нахождения частоты следует использовать средний период пульсаций $\Omega_r = 2\pi/\langle T \rangle$, полученный как отношение длительности импульса накачки к количеству релаксационных импульсов излучения. На рис. 1 представлена работа лазера в режиме свободной генерации при различных энергиях накачки. Видно, что с увеличением энергии накачки частота релаксационных пульсаций возрастает, а время задержки генерации уменьшается.

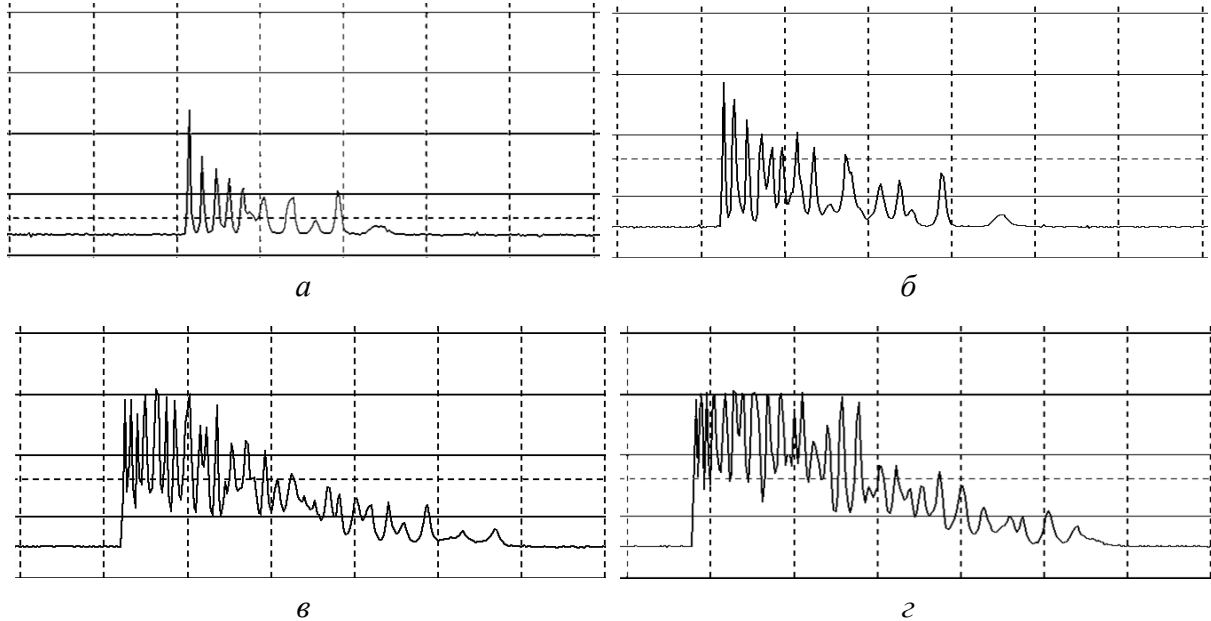


Рис. 1. – Режим свободной генерации лазера при энергиях накачки: 5,7 Дж (время задержки генерации $t_d = 142$ мкс) (а); 6,0 Дж ($t_d = 123$ мкс) (б); 7,0 Дж ($t_d = 104$ мкс) (в); 7,5 Дж ($t_d = 96$ мкс) (г).

Частота дискретизации – 50 мкс/дел; развертка по амплитуде – 50 мВ/дел.

График зависимости квадрата частоты релаксационных колебаний от средней выходной мощности излучения представлен на рис. 2. По его наклону определяется вероятность вынужденного излучательного перехода на один фотон.

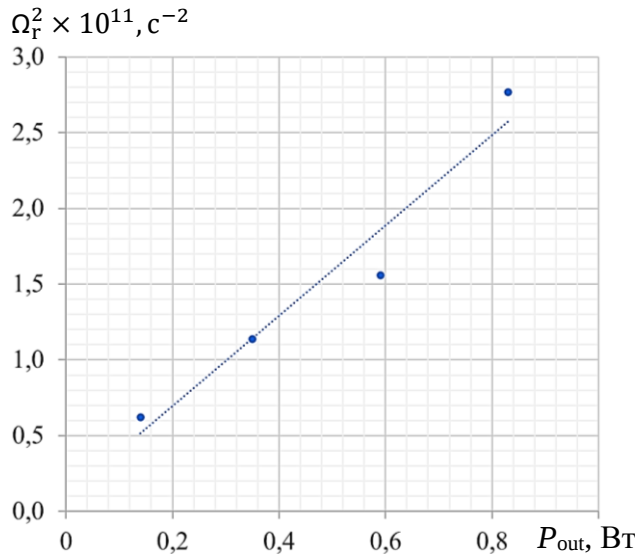


Рис. 2. – Зависимость квадрата частоты релаксационных колебаний от средней выходной мощности излучения.

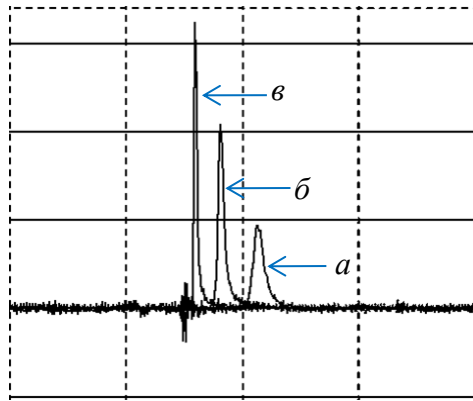


Рис. 3 – Гигантские импульсы в режиме модуляции добротности при энергиях накачки:

6,0 Дж ($\tau = 100$ нс; $t_d = 4,1$ мкс) (a);

6,5 Дж ($\tau = 54$ нс; $t_d = 3,8$ мкс) (б);

9,0 Дж ($\tau = 26,5$ нс; $t_d = 3,6$ мкс) (в).

Частота дискретизации – 1 мкс/дел.

длительности импульса замедляется (при увеличении накачки с 9,0 до 10,0 Дж $\Delta\tau = 1,5$ нс). Также уменьшается время задержки генерации.

Максимальная инверсная населенность $n_{\max}$ рассчитывается по формуле:

$$\frac{n_{\max}}{n_0} = \frac{s_{\max}}{n_0} + 1 = \frac{P_{\max} B \tau_{\text{ph}}^2}{\hbar \omega} + 1, \quad (11)$$

где $P_{\max} = P_{\text{out}} / (f \cdot t_{\text{имп}})$ – пиковая мощность генерации лазера; f – частота следования импульсов, $t_{\text{имп}}$ – измеренная длительность импульса.

Время жизни фотонов в резонаторе определяется выражением:

$$\tau_{\text{ph}} = \frac{1}{\nu \alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}, \quad (9)$$

где α – средний по резонатору коэффициент потерь; ν – средняя скорость фотонов в резонаторе; L – длина резонатора; R_1, R_2 – коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Пороговое значение инверсной населенности можно рассчитать по ранее определенным параметрам:

$$n_0 = \frac{1}{B \tau_{\text{ph}}}. \quad (10)$$

Интенсивность излучения лазера в нестационарном режиме определяется превышением инверсии населенности над ее пороговым значением в процессе генерации. Как показывает практика, в режиме свободной генерации эта разность невелика, поэтому исследовать эту зависимость нагляднее при работе лазера в режиме модуляции добротности. На рис. 3 изображены импульсы в режиме активной модуляции добротности. Время задержки включения электрооптического затвора – 170 мкс. При энергиях накачки, близким к порогу генерации, даже незначительный ее рост ведет к резкому сокращению длительности импульса (при изменении накачки с 6,0 до 6,5 Дж $\Delta\tau = 46$ нс). С дальнейшим увеличением накачки темп уменьшения

На рис. 4 показана зависимость отношения максимальной инверсной населенности к ее пороговому значению от энергии накачки: при $E = 7,5$ Дж $n_{\max}/n_0 = 8,01$.

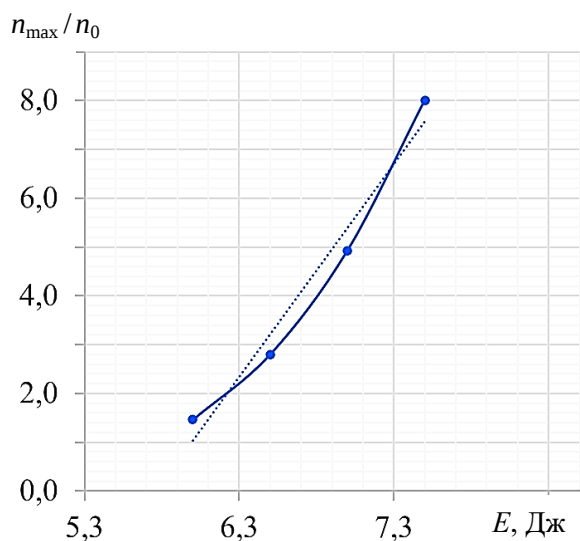


Рис. 4. – Зависимость отношения максимальной инверсной населенности к ее пороговому значению от энергии накачки (моноимпульсный режим).

В экспериментальной установке используется YAG: Nd³⁺ лазер LOTIS LS-2132Y. Регистрация временных характеристик генерации производится с помощью компьютерной осциллографической платы BORDO-221. Для измерения энергетических характеристик генерации используется система измерения средней мощности лазерного излучения (ИМО-2Н).

Расчетное время жизни фотонов в резонаторе составило 4,86 нс; вероятность вынужденного излучательного перехода в расчете на один фотон – $3,34 \times 10^{-8} \text{ с}^{-1}$; пороговое значение инверсной населенности – $6,17 \times 10^{15}$ (в абсолютных единицах). При энергии накачки 10 Дж длительность импульса в режиме активной модуляции добротности составила 25 нс, что $\approx 5\tau_{\text{ph}}$.

Литература

1. Толстик, А. Л. Лазерная физика. Лабораторный практикум / А. Л. Толстик, И. Н. Агисhev, Е. А. Мельникова. Минск: БГУ, 2006. С. 23–51.
2. Манак, И. С. Квантовая радиофизика. Практикум / И. С. Манак, Е. Д. Карих, В. В. Жуковский. Минск: БГУ, 2007. С. 70–93.
3. Никитин, С.И. Лазер на кристалле иттрий-алюминиевого граната с неодимом. Методическое пособие к лабораторной работе / С. И. Никитин, А. С. Низамутдинов, Л. А. Нуртдинова. Казань: Ин-т физики Казанского (Приволжского) федерального ун-та, 2013. 50 с.

Investigation of lasing dynamic in a laboratory practicum on quantum radiophysics

O. P. Dul, V. M. Stetsik, A. V. Barkova, A. A. Afonenko

Belarusian State University, Minsk;
e-mail: olgadul@bsu.by

A laboratory work was developed to study free generation and Q-switching modes in a YAG: Nd³⁺ solid-state laser. Students are invited to study the laser dynamic modes, and the methodology for determining the internal laser parameters by its temporal characteristics in the free generation and active Q-switching modes. The proposed determination method makes it possible to calculate the lifetime of the upper laser level, the photons lifetime in the cavity, the probability of a stimulated radiative transition per photon, the threshold value of the inverse population, and to obtain the dependence of the maximum inverse population on the pump energy. This work allows students to get the necessary knowledge about laser generation and acquire working skills with specialized equipment and software.

Keywords: balance equations, photon lifetime in the cavity, relaxation oscillations, active Q-switching mode, population inversion.