

Импульсная генерация лазера на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ с малым джиттером периода следования импульсов при комбинированной диодной накачке

М.И.Беловолов, А.Ф.Шаталов

Исследована импульсная генерация твердотельного неодимового лазера (ТТЛ) на кристалле кальций-галлий-германиевого граната $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ (CGGG:Nd) с модуляцией добротности пассивным затвором на $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$. Для уменьшения джиттера периода следования импульсов генерации ТТЛ ток диода накачки комбинировался из постоянной составляющей и короткого импульса. Показано, что если сумма постоянной и импульсной составляющих оптической мощности накачки превышает пороговую мощность накачки менее чем в два раза ($1 < x_p < 2$), то джиттер периода импульсов генерации ТТЛ имеет локальный минимум, который достигается, когда величина постоянной составляющей мощности накачки относительно пороговой мощности составляет $2 - x_p$. Предложено измерять радиационное время жизни τ верхнего уровня лазерного элемента (ЛЭ) в резонаторе ТТЛ по времени задержки импульса генерации ТТЛ относительно переднего фронта импульса накачки. Показано, что это время меньше, чем время τ , измеренное по стандартной методике для ЛЭ вне резонатора ТТЛ. При частоте импульсов генерации лазера 192 Гц, энергии импульса 3.5 мкДж и длительности импульса 11 нс относительная величина джиттера периода импульсов генерации составляла $\sim 0.06\%$, что более чем на два порядка меньше джиттера периода импульсов генерации ТТЛ при постоянном токе диода накачки.

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

1. Введение

Активированные неодимом кристаллы кальций-галлий-германиевого граната $\text{Ca}_3\text{Ga}_2\text{Ge}_3\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ (CGGG:Nd) являются перспективным материалом для создания компактных импульсных твердотельных лазеров (ТТЛ) с диодной накачкой, так как они близки по эффективности генерации к лазерным кристаллам $\text{YAG}:\text{Nd}$ [1–4], но превосходят последние благодаря большей примерно в 4 раза ширине линии поглощения [4] (что облегчает их согласование с излучением диода накачки) и большим в несколько раз энергией и пиковой мощностью генерируемых импульсов [5, 6]. Для импульсного ТТЛ важным параметром является джиттер периода T следования генерируемых импульсов, который определяет стабильность частоты $f = 1/T$ импульсов генерации. Джиттер ТТЛ с диодной накачкой при пассивной модуляции добротности резонатора растет с уменьшением частоты f как $1/f^\gamma$ ($\gamma = 1.3 - 1.4$) и составляет при $f \sim 10$ кГц около 10% [7, 8]. Для уменьшения джиттера импульсного ТТЛ на основе $\text{YAG}:\text{Nd}$ использовалась комбинированная накачка лазерного кристалла или по схеме с двумя диодами накачки [9], или по более простой схеме – с одним диодом [10, 11], когда комбинированная накачка ТТЛ обеспечивается соответствующим изменением тока диода накачки.

В настоящей работе теоретически и эксперименталь-

но изучаются возможности уменьшения джиттера импульсного ТТЛ на основе кристалла CGGG:Nd с пассивной модуляцией добротности резонатора при накачке лазера одним диодом, ток которого комбинируется из постоянной составляющей и короткого импульса.

2. Теория

Динамика плотности n инверсной населенности в лазерном элементе (ЛЭ) и плотности ϕ фотонов в резонаторе лазера описывается уравнениями [12]

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

$$\frac{dn}{dt} = N_p - \frac{n}{\tau} - \gamma\sigma\phi n, \quad (2)$$

где n_s и σ_s – плотность населенности и сечение поглощения нижнего уровня (3A_2 для $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$) насыщающегося поглотителя (НП); n_{es} и σ_{es} – плотность населенности и сечение поглощения возбужденного уровня (3T_2) НП; σ – эффективное сечение индуцированных переходов ЛЭ; d – толщина ЛЭ; d_s – толщина НП; R – отражательная способность зеркал резонатора; L – пассивные потери при полном проходе светом длины резонатора (исключая потери в НП); γ – коэффициент вырождения инверсии в ЛЭ; N_p – скорость накачки; τ – радиационное время жизни верхнего лазерного уровня ЛЭ; $t_r = 2l'/c$ – время полного прохода светом длины резонатора лазера; c – скорость света в вакууме; l' – оптическая длина резонатора лазера.

Поскольку перед началом генерации $d\phi/dt = 0$, а уровень 3T_1 поглощения НП практически пустой, то из

М.И.Беловолов, А.Ф.Шаталов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: bmi@fo.gpi.ru, shatalov@fo.gpi.ru

(1), опуская член с σ_{es} , находим пороговую плотность инверсной населенности в ЛЭ

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

которая равна плотности инверсной населенности в ЛЭ в момент начала генерации лазера (здесь n_{si} – плотность населенности нижнего уровня НП в момент начала генерации). Тогда решение (2) в отсутствие генерации ($\phi = 0$) можно записать в виде

$$n(t) = N_p \tau - (N_p \tau - n_{of}) \exp(-t/\tau), \quad (4)$$

где n_{of} – начальная плотность инверсной населенности в ЛЭ.

На рис.1 показаны зависимости мощности оптической накачки и плотности инверсной населенности в ЛЭ от времени. Используя (4), получаем следующее выражение для задержки начала генерации лазера относительно переднего фронта импульса накачки:

$$T_0 = \tau \ln \frac{x_p - x_0}{x_p - 1}, \quad (5)$$

где $x_p = N_p \tau / n_i$; $x_0 = n_{of} / n_i$.

В зависимости от режима работы лазера величина n_{of} может равняться нулю, n_i или произведению $N_{op} \tau$, где N_{op} – скорость накачки, соответствующая мощности P_0 . Мощности P_p соответствует скорость накачки N_p . Величина конечной плотности n_f инверсной населенности в ЛЭ зависит от режима работы лазера и характеристик ЛЭ и может быть как равной нулю, так и отличной от нуля. При $P_{imp} = 0$ ($P_p = P_0$) и $N_p \tau > n_i$ лазер будет работать в автоколебательном режиме с периодом $T = T_0$, причем плотность n_{of} будет равна n_f .

Из (5) следует, что джиттер j периода T генерации импульсов лазером будет определяться флуктуациями $j_1 = \delta n_{p\tau}$, $j_2 = \delta n_{of}$ и $j_3 = \delta n_i$ параметров $n_{p\tau} = N_p \tau$, n_{of} и n_i :

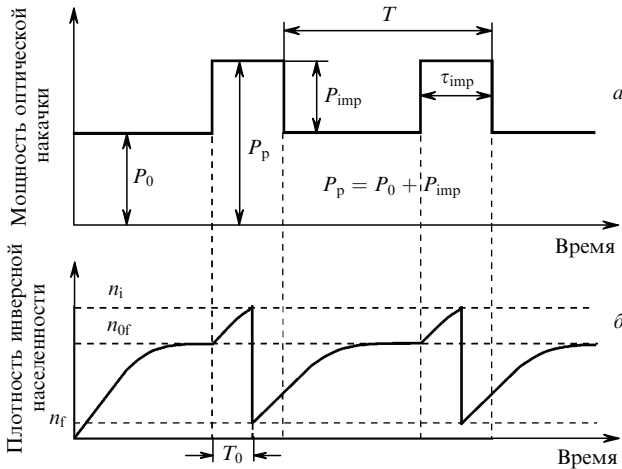


Рис.1. Зависимости мощности P_n оптической накачки (а) и плотности n инверсной населенности ЛЭ (б) от времени; P_0 и P_{imp} – постоянная и импульсная составляющие оптической мощности накачки $P_p = P_0 + P_{imp}$, T и $f = T^{-1}$ – период и частота следования импульсов накачки, τ_{imp} – их длительность, T_0 – время задержки начала генерации лазера относительно переднего фронта импульса накачки, n_f – конечная плотность инверсной населенности в ЛЭ.

$$j = \left[\left(\frac{\partial T_0}{\partial n_{p\tau}} \right)^2 j_1^2 + \left(\frac{\partial T_0}{\partial n_{of}} \right)^2 j_2^2 + \left(\frac{\partial T_0}{\partial n_i} \right)^2 j_3^2 \right]^{1/2} = \frac{\tau}{n_i} [y_1^2 j_1^2 + y_2^2 j_2^2 + y_3^2 j_3^2]^{1/2}, \quad (6)$$

где

$$y_1 = \frac{1 - x_0}{(x_p - x_0)(x_p - 1)}; \quad y_2 = \frac{1}{x_p - x_0}; \quad y_3 = \frac{1}{x_p - 1}; \quad x_p > 1; \quad 0 \leq x_0 < 1. \quad (7)$$

Флуктуации j_3 параметра n_i могут проявляться, как следует из (3), через флуктуации параметров R и L при температурных и механических воздействиях на лазер. Так как последние в основном низкочастотные, то их влияние можно существенно снизить, применяя термостабилизацию и демпфирование, а также уменьшая коэффициент y_3 (увеличивая x_p). В большинстве случаев джиттер j обусловлен флуктуациями мощности диода накачки [13]. В этих случаях при $P_0 \neq 0$, $j_1 = j_2 = j_d$ величина джиттера j в (6) будет определяться коэффициентом

$$y = (y_1^2 + y_2^2)^{1/2} = \frac{[x_p^2 + x_0^2 - 2(x_p + x_0) + 2]^{1/2}}{(x_p - x_0)(x_p - 1)}. \quad (8)$$

Коэффициент $y(x_p, x_0)$ при $x_0 = x_{0min} = 2 - x_p$ имеет локальный минимум, равный $y(x_p, x_{0min}) = y_{min} = [\sqrt{2}(x_p - 1)]^{-1}$.

На рис.2 показаны зависимости коэффициента y от x_0 , от x_p , от x_p, x_0 , а также x_{0min} от x_p . Анализ полученных результатов показывает, что при $P_0 \neq 0$ и $1 < x_p < 2$ (P_p превышает порог менее чем в 2 раза) выбором P_0 ($x_0 = x_{0min} = 2 - x_p$) можно добиться при заданном x_p минимального джиттера, который будет определяться коэффициентом y_{min} . Дальнейшее уменьшение джиттера возможно путем большего увеличения x_p (большого увеличения мощности P_p).

Представляет интерес режим работы лазера, когда n_{of} равно n_f или нулю. В этом случае флуктуации мощности диода накачки будут проявляться в джиттере j только через коэффициент y_1 . В этом случае, как следует из рис.3, на котором показаны зависимости коэффициента y_1 от x_p и от x_0 , всегда можно при заданном $x_0(P_0)$ выбором $x_p(P_p)$, так же как при заданном x_p выбором x_0 , уменьшить джиттер j на один-два порядка.

Оптическую энергию E_{imp} запуска генерации ТТЛ импульсом τ_{imp} (см. рис.1) можно представить в виде

$$E_{imp} = P_{imp} T_0 = (P_p - P_0) T_0 = k n_i \tau y_{imp}(x_p, x_0), \quad (9)$$

где $P_0 = k n_{of}$; $P_p = k n_{p\tau}$; k – коэффициент пропорциональности;

$$y_{imp}(x_p, x_0) = (x_p - x_0) \ln \frac{x_p - x_0}{x_p - 1}. \quad (10)$$

На рис.4 показаны зависимости коэффициента y_{imp} от x_p и x_0 . Из полученных результатов следует, что коэффициент y_{imp} при увеличении x_p уменьшается и стремится к своему предельному значению $y_{imp} = 1 - x_0$, которое соответствует разности энергий, накопленных в резонаторе лазера при плотностях n_i и n_{of} инверсной населенности.

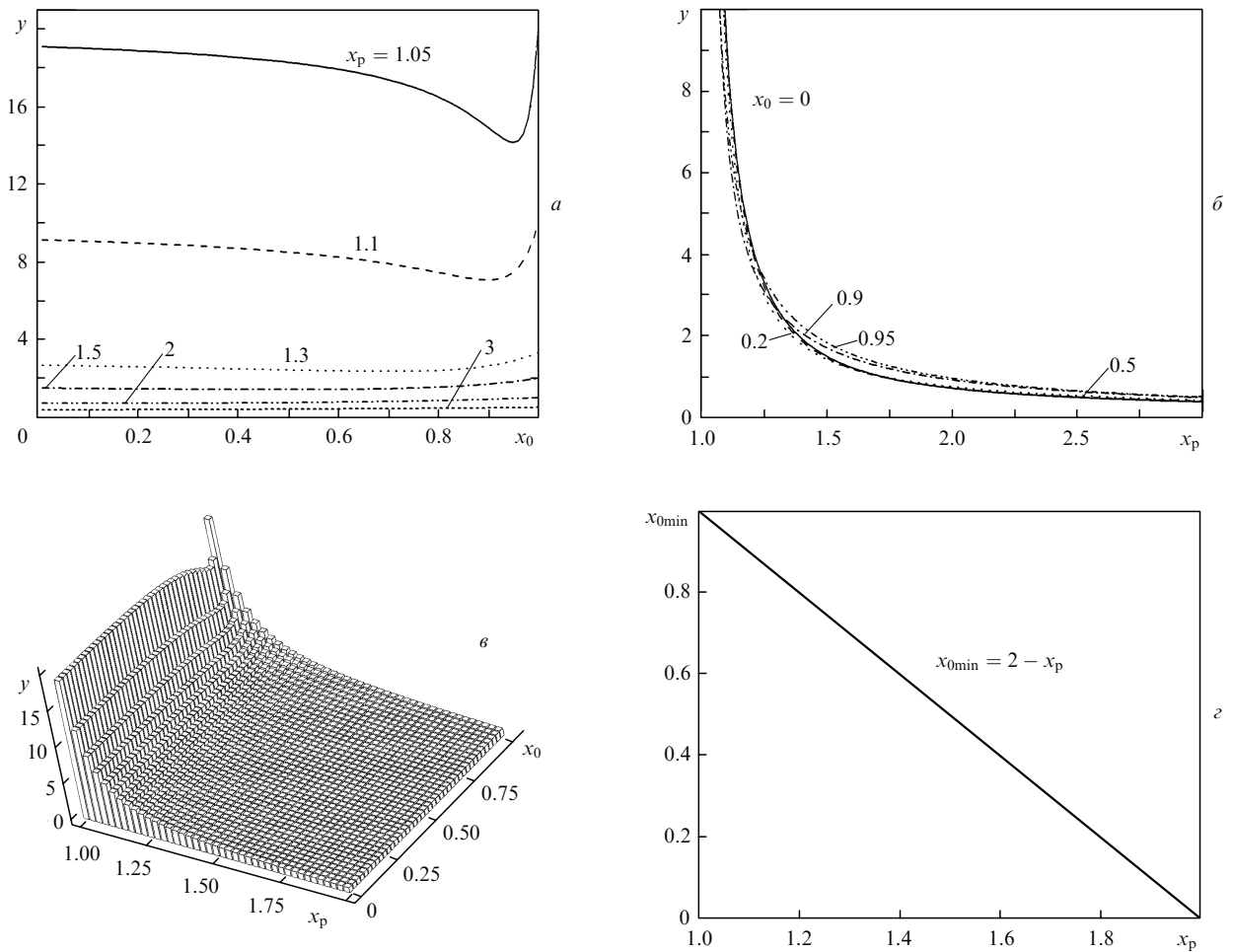


Рис.2. Зависимости коэффициента y от x_0 (а), от x_p (б), от x_p и x_0 в областях $0 \leq x_0 < 1$, $1 \leq x_p \leq 2$ (в), а также $x_{0\min}$ от x_p (г).

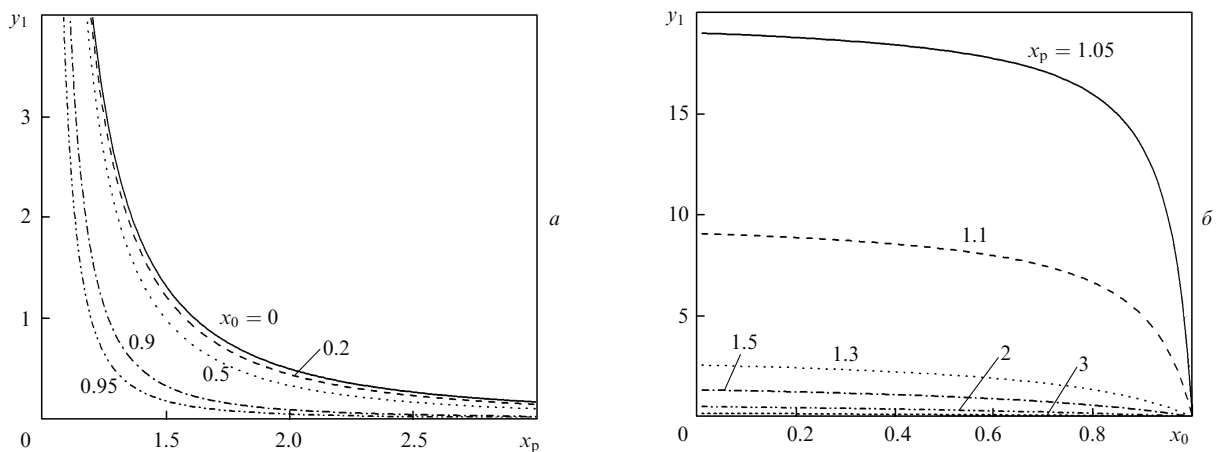


Рис.3. Зависимости коэффициента y_1 от от x_p (а) и от x_0 (б).

При $x_p \geq 2$ и $0 \leq x_0 \leq 0.95$ коэффициент $y_{\text{имп}}$, как и энергия $E_{\text{имп}}$ запуска генерации ТТЛ, превышают свои предельные значения не более чем на 40 %.

Учитывая рассмотренные особенности коэффициента $y_{\text{имп}}$ при больших x_p и используя (9), можно показать, что параметры P_0 , $P_{\text{имп}}$ и $\tau_{\text{имп}}$ оптической накачки при импульсной генерации ТТЛ должны с необходимостью удовлетворять требованию

$$P_{\text{имп}}\tau_{\text{имп}} > \tau(P_{\text{th}} - P_0), \tag{11}$$

где P_{th} – пороговая оптическая мощность накачки, которой соответствует инверсная плотность n_i ($P_{\text{th}} = kn_i$). Требование (11) облегчает на практике получение нужного режима генерации импульсного ТТЛ с пассивным модулятором в резонаторе.

3. Эксперимент

Схема установки для исследования джиттера импульсов генерации лазера на кристалле CGGG:Nd при ком-

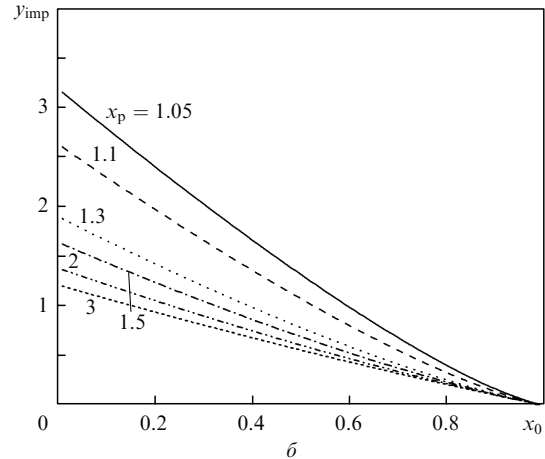
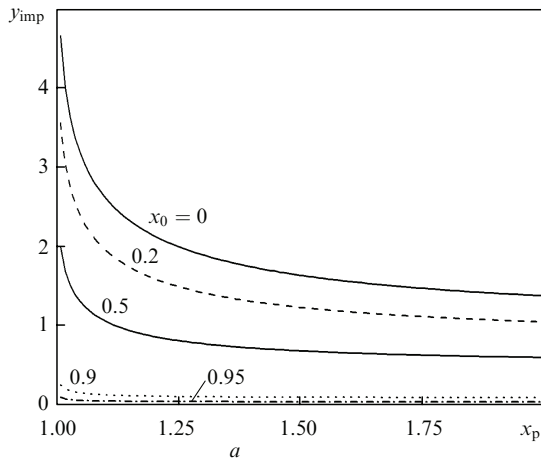


Рис.4. Зависимости коэффициента y_{imp} от x_p (а) и от x_0 (б).

бинированном токе диода накачки показана на рис.5. Источник тока I модулировал выходную мощность излучения (длина волны $\lambda_p = 805$ нм) лазерного диода 2 с волоконным выходом 3 (NA = 0.22, $d_c = 100$ мкм). Ширина спектра излучения накачки на полувывоте составляла 2 нм. Микрообъектив 4 фокусировал излучение накачки на лазерный элемент 5 в пятно диаметром 90 мкм. ЛЭ укреплялся на медном теплоотводе с помощью термопасты. Его передняя грань (на рис.5 зачернена) – входное зеркало ЛЭ – вместе со сферическим зеркалом 7 (коэффициент пропускания 0.01 и радиус 5 см) образуют резонатор лазера. В резонатор помещался насыщающийся поглотитель 6 (кристалл YAG:Cr⁴⁺ толщиной 1 мм, просветленный на $\lambda = 1.06$ мкм, с коэффициентом пропускания 0.9 при малых интенсивностях падающего на него излучения). Концентрация Nd³⁺ в кристалле CGGG:Nd составляла 2.0×10^{20} см⁻³. Толщина ЛЭ равнялась 1.5 мм, за один проход в нем поглощалось 80% излучения накачки. Форма и временные параметры лазерных импульсов генерации измерялись с помощью малошумящего широкополосного фотоприёмника 8 и осциллографа 9 (Tektronix TDS 5104). В качестве измерителя мощности I_0 использовался Coherent FieldMaster FM с измерительной головкой LM10.

На рис.6 показаны зависимости мощности P_d излучения диода накачки от тока I накачки, а также осциллограммы импульсов тока и мощности накачки. Пороговый ток диода накачки составлял 0.32 А.

Постоянная I_0 и импульсная I_{imp} составляющие (действующее значение) тока диода накачки определялись за вычетом порогового тока диода. Крутизна ватт-амперной характеристики диода составила 0.96 Вт/А. Поскольку величины I_0 и I_{imp} пропорциональны P_0 и P_{imp} , как и $P_{th} \propto I_{th}$, то в соответствии с (11) имеем

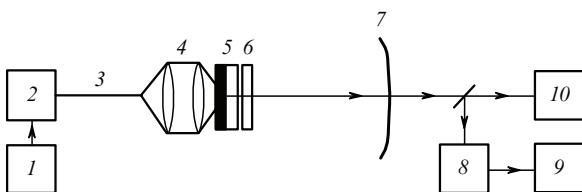


Рис.5. Схема экспериментальной установки для исследования джиттера импульсов генерации лазера на кристалле CGGG:Nd при комбинированном токе диода накачки.

$$I_{imp} \tau_{imp} > \tau(I_{th} - I_0). \tag{12}$$

На рис.7 показан джиттер периода следования импульсов генерации лазера при разных параметрах тока накачки. В случае автоколебательного режима лазера [7, 8] (рис.7,б) импульсная составляющая тока накачки $I_{imp} = 0$, частота $f = 3.9$ кГц и $j = 22$ мкс. Аналогично [8] джиттер j измерялся равным четвертой части интервала

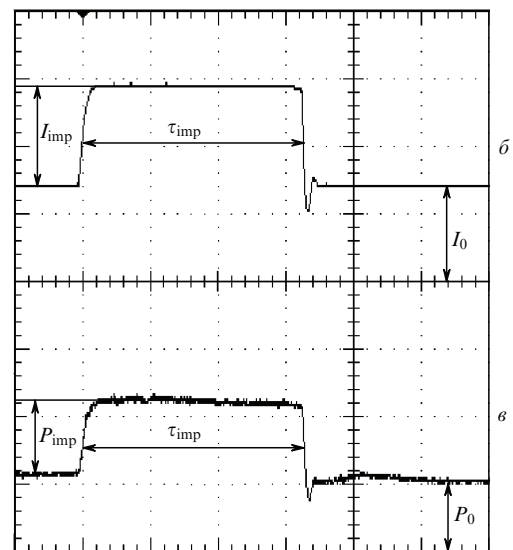
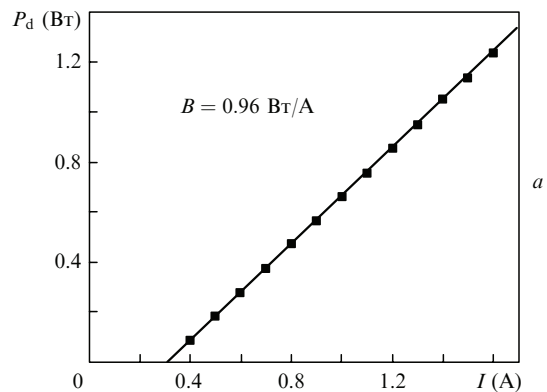


Рис.6. Ватт-амперная характеристика диода накачки (а) и осциллограммы тока (б) и мощности оптической накачки (в); $I_0 = 0.49$ А, $I_{imp} = 0.43$ А, $\tau_{imp} = 130$ мкс, $P_0 = 0.47$ Вт, $P_{imp} = 0.41$ Вт.

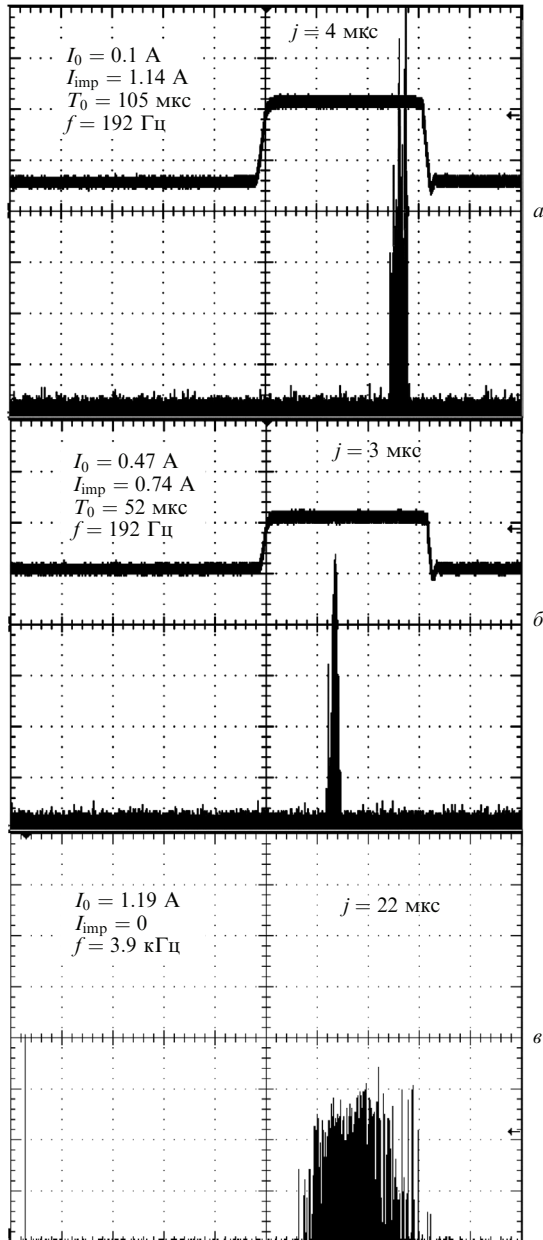


Рис.7. Джиттер периода следования импульсов генерации лазера при различных параметрах тока диода накачки. Масштаб по горизонтали 50 мкс/дел.

разброса генерируемых лазером импульсов на экране осциллографа. Уменьшение джиттера с 22 до 3 мкс (более чем в 7 раз) получено за счет выбора параметров тока. При этом относительная величина джиттера уменьшилась с 8.6 % до 0.06 %, т.е. в 143 раза. Подчеркнем, что при постоянном токе накачки, если не прибегать к специальным мерам, уменьшение частоты f приводит к увеличению джиттера: $j \sim 1/f^\gamma$ ($\gamma = 1.3 - 1.4$) [8].

На рис.8 показаны экспериментальная и теоретическая зависимости джиттера j от параметра x_0 ($x_p = 1.56$). Теоретическая кривая (соответствует параметру y , умноженному на $\tau_{jd}/n_i = 2.8$ мкс) и экспериментальные точки показывают наличие минимума джиттера в области $x_0 = 2 - x_p = 0.44$.

На рис.9 показана зависимость времени задержки T_0 от $\ln[(x_p - x_0)/(x_p - 1)]$. Тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей экспериментальные точки, равен

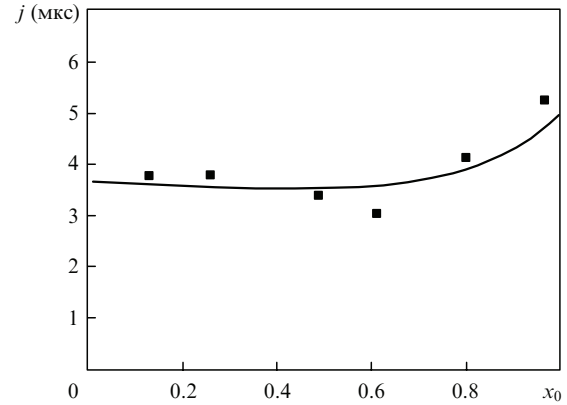


Рис.8. Экспериментальная (точки) и теоретическая (кривая) зависимости джиттера от параметра x_0 ($x_p = 1.56$).

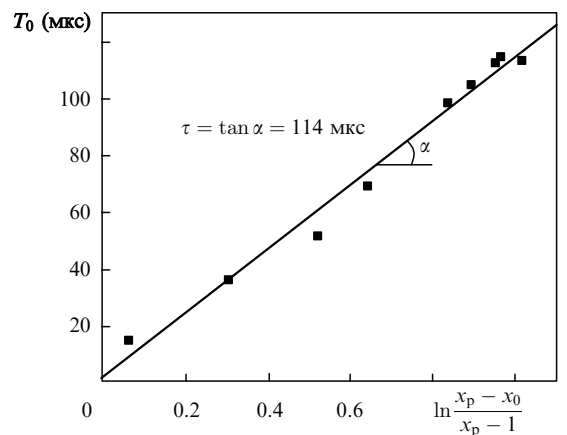


Рис.9. Зависимость времени задержки импульса генерации лазера T_0 относительно переднего фронта импульса накачки от $\ln[(x_p - x_0)/(x_p - 1)]$.

радиационному времени τ жизни верхнего лазерного уровня ЛЭ в резонаторе ТТЛ. Из данных рис.9 следует, что $\tau = 114$ мкс; это меньше того же времени ($\tau = 230$ мкс [8]), измеренного по стандартной методике для находящегося вне резонатора ЛЭ. Уменьшение времени τ для ЛЭ в резонаторе обусловлено усилением спонтанного излучения, в результате чего радиационное время жизни верхнего лазерного уровня ЛЭ уменьшается [14]. Это показывает, что при накачке ТТЛ (в уравнениях (4), (5), (9), (11), (12)) необходимо учитывать радиационное время жизни τ верхнего лазерного уровня для ЛЭ в резонаторе, которое можно измерить по задержке T_0 импульса генерации ТТЛ относительно переднего фронта импульса накачки.

Для самой нижней экспериментальной точки рис.9 ($T_0 = 15$ мкс) оптическая энергия E_{imp} запуска генерации ТТЛ составляет 6.3 мкДж, превышая свое предельное значение (3.0 мкДж) в 2.1 раза. Отношение энергии $E_{\text{las}} = 3.5$ мкДж генерируемого ТТЛ импульса к энергии E_{imp} для этого случая равно 0.56, а отношение пиковой мощности импульса генерации к мощности P_{imp} импульса накачки составляет 8×10^2 .

4. Заключение

В работе теоретически и экспериментально исследованы возможности уменьшения джиттера периода следования импульсов генерации ТТЛ на кристалле

CGGG:Nd с насыщающимся поглотителем YAG:Cr⁴⁺ внутри резонатора при комбинированном токе диода накачки, состоящем из постоянной I_0 и импульсной I_{imp} (длительностью τ_{imp}) составляющих.

Показано, что джиттер лазера имеет локальный минимум при $I_0 = 2I_{\text{th}} - I_p$, если действующий ток $I_p = I_0 + I_{\text{imp}}$ превышает пороговый I_{th} менее чем в два раза. Сформулировано необходимое требование к параметрам I_0 , I_{imp} и τ_{imp} тока диода накачки для импульсной генерации ТТЛ: $I_{\text{imp}}\tau_{\text{imp}} > \tau(I_{\text{th}} - I_0)$.

Показано, что при $0 \leq I_0 \leq 0.95I_{\text{th}}$ и $I_p \geq 2I_{\text{th}}$ оптическая энергия E_{imp} запуска генерации ТТЛ импульсом τ_{imp} превышает свое предельное значение $E_0 = (P_{\text{th}} - P_0)\tau$ не более чем на 40 %. Для энергии $E_{\text{imp}} = 2.1E_0$ отношение пиковой мощности импульса генерации лазера к мощности импульса накачки составляло 8×10^2 .

При частоте следования импульсов генерации лазера 192 Гц, энергии и длительности импульса 3.5 мкДж и 11 нс выбором параметров I_0 , I_{imp} и τ_{imp} получена относительная величина джиттера $\sim 0.06\%$, что более чем на два порядка меньше джиттера при постоянном токе диода накачки.

Авторы благодарят участников семинара, руководимого Е.М.Диановым, за обсуждение результатов работы.

1. Belovolov M.I., Dianov E.M., Timoschekhin M.I., Morozov N.P., Prokhorov A.M., Timoschekhin K.M. *Proc. CLEO/Europa'96* (Hamburg, Germany, 1996, Paper CTh160, p. 281).
2. Jaque D., Caldino U., Romero J.J., Garcia Sole J. *J. Appl. Phys.*, **86**, 6627 (1999).
3. Jaque D., Romero J.J., Garcia Sole J. *J. Appl. Phys.*, **92**, 3436 (2002).
4. Беловолов М.И., Державин С.И., Машковский Д.А., Сальников К.С., Сысоев Н.Н., Тимошечкин М.И., Шаталов А.Ф. *Квантовая электроника*, **37**, 753 (2007).
5. Montes M., Heras C., Jaque D. *Opt. Mater.*, **28**, 408 (2006).
6. Беловолов М.И., Державин С.И., Шаталов А.Ф. *Квантовая электроника*, **38**, 923 (2008).
7. Nodop D., Limpert J., Hohmuth R., Richter W., Guina M., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **32**, 2115 (2007).
8. Беловолов М.И., Шаталов А.Ф. *Квантовая электроника*, **38**, 933 (2008).
9. Khurgin J.B., Jin F., Solyar G., Wang C.C., Trivedi S. *Appl. Opt.*, **41**, 1095 (2002).
10. Lai N.D., Brunel M., Bretenaker F., Floch A.L. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1073 (2001).
11. Yan P., Tian X., Gong M., Xie T. *Opt. Eng.*, **44**, 14201 (2005).
12. Degnan J.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 1890 (1995).
13. Afzal R.S., Yu A.W., Zayhowski J.J., Fan T.Y. *Opt. Lett.*, **22**, 1314 (1997).
14. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. *Лазеры на кристаллах и их применение* (М.: Радио и связь, 1998).