

Высокочастотный Yb-микролазер с диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности

В.Э.Кисель, А.С.Ясюкевич, Н.В.Кондратюк, Н.В.Кулешов

Предложена модификация системы балансных уравнений для квазитрехуровневых лазеров, работающих в режиме пассивной модуляции добротности с медленным насыщающимся поглотителем. Проведены расчеты оптимальных параметров микро칩-лазера на YAG: Yb³⁺ с пассивным Cr⁴⁺: YAG-модулятором при частоте следования импульсов ~100 кГц. Экспериментально продемонстрирована генерация в микро칩-лазере на YAG: Yb–YAG: Cr на одной продольной моде резонатора с частотой следования импульсов более 100 кГц, средней выходной мощностью 0.45 Вт и пиковой мощностью 1.5 кВт. В многомодовом режиме генерации получены импульсы с пиковой мощностью 4.2 кВт при средней выходной мощности 0.8 Вт и частоте следования импульсов 100 кГц.

Ключевые слова: пассивная модуляция добротности, квазитрехуровневые лазеры, балансные уравнения, микро칩-лазеры на YAG: Yb, пассивный Cr: YAG-модулятор.

1. Введение

Импульсные твердотельные лазеры с диодной накачкой, работающие в режиме пассивной модуляции добротности (ПМД), широко используются в научных, медицинских и промышленных системах. Достоинством таких лазеров является простота, надежность в эксплуатации и низкая стоимость. Большинство работ по исследованию данного типа лазерных систем посвящено исследованию неодимовых и иттербиевых лазеров с ПМД посредством использования Cr⁴⁺-содержащих кристаллических и полупроводниковых насыщающихся поглотителей [1, 2].

Наибольший интерес у исследователей вызывали лазерные системы с высокой пиковой мощностью импульса и относительно низкими (до нескольких десятков килогерц) частотами следования, однако ряд практических приложений, таких как дальнометрия с высоким разрешением и проточная цитометрия, требуют более высоких частот следования импульсов (~100 кГц). Недавно стабильный одночастотный режим ПМД был продемонстрирован в лазере на GdVO₄:Nd с пассивным затвором на основе кристалла YAG:Cr. Получены импульсы с пиковой мощностью до 4 кВт и частотой следования до 80 кГц [3]. Настоящая статья посвящена разработке Yb:YAG-лазера с диодной накачкой и ПМД затвором на основе кристалла YAG:Cr, генерирующего цуг импульсов с частотой следования ~100 кГц и пиковой мощностью более 2 кВт.

2. Теоретическая модель квазитрехуровневого лазера с «медленным» насыщающимся поглотителем

Лазерные материалы, легированные ионами Yb³⁺, являются квазитрехуровневыми активными средами. В таких материалах термическое заселение подуровней как верхнего, так и нижнего лазерных уровней (мультиплетов) приводит к тому, что с излучением накачки и генерации взаимодействуют оба лазерных уровня. Это необходимо учитывать при описании работы лазеров.

Система балансных уравнений для лазера на основе квазитрехуровневой среды с пассивным Cr:YAG-модулятором для величин, усредненных по объему моды генерируемого излучения, может быть записана в виде

$$\frac{dI_g}{dt} = \frac{c\mu}{n}(k_g - k_L - k_{sa})I_g,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_p}{h\nu_p}k_p - \frac{I_g}{h\nu_g}k_g - \frac{N_2}{\tau},$$

$$\frac{dN_{gs}}{dt} = -\zeta \frac{I_g}{h\nu_g} \sigma_{gs} N_{gs} + \frac{N_{sa} - N_{gs}}{\tau_{sa}}, \quad (1)$$

$$N_1 + N_2 = N,$$

$$N_{gs} + N_{es} = N_{sa}.$$

Здесь I_g и I_p – интенсивности генерируемого излучения и излучения накачки; $\mu = l_a n / l_c$ – коэффициент заполнения резонатора; l_a – длина активного элемента; n – показатель преломления активного элемента; l_c – оптическая длина резонатора; ν_p и ν_g – частоты излучения накачки и генерации; $k_g = \sigma_{em}^g N_2 - \sigma_{abs}^g N_1$ – коэффициент усиления на частоте генерируемого излучения; τ – время жизни

В.Э.Кисель, А.С.Ясюкевич, Н.В.Кондратюк, Н.В.Кулешов. НИИ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета, Белоруссия, 220013 Минск, просп. Независимости, 65; e-mail: VEKisel@bntu.by

верхнего лазерного уровня; σ_{cm}^g и σ_{abs}^g – сечения стимулированного излучения и поглощения на частоте генерируемого излучения; N_2 и N_1 – населенности верхнего и нижнего мультиплетов; $k_p = \sigma_{\text{abs}}^p N_1 - \sigma_{\text{cm}}^p N_2$ – коэффициент поглощения на частоте излучения накачки; σ_{abs}^p и σ_{cm}^p – сечения поглощения и стимулированного испускания на частоте излучения накачки; $k_L = -[\ln R_{\text{out}} + \ln(1-L)]/(2l_a)$ – коэффициент потерь резонатора; N – концентрация примесных центров в активной среде; R_{out} – коэффициент отражения выходного зеркала; L – коэффициент относительных неактивных потерь резонатора; $k_{\text{sa}} = (\sigma_{\text{gs}} N_{\text{gs}} + \sigma_{\text{es}} N_{\text{es}}) l_{\text{sa}} / l_a$ – коэффициент потерь в пассивном модуляторе; σ_{gs} и σ_{es} – сечения поглощения из основного и возбужденного состояний пассивного Cr:YAG-модулятора; N_{gs} и N_{es} – населенности основного и возбужденного состояний пассивного модулятора; l_{sa} – длина пассивного модулятора; N_{sa} – концентрация ионов Cr⁴⁺ в пассивном модуляторе; τ_{sa} – время жизни иона хрома в возбужденном состоянии; $\xi = A_g/A_{\text{sa}}$ – отношение эффективных площадей A_g и A_{sa} моды генерации в активной среде и пассивном модуляторе.

На этапе генерации моноимпульса система уравнений (1) упрощается за счет отбрасывания членов, описывающих скорость накачки и релаксационные процессы в активном элементе и пассивном модуляторе. Система укороченных уравнений в новых переменных приобретает вид

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_g}{dt} &= \frac{c\mu}{n} (\sigma_g N_{2g} - k_L^*) \Phi_g, \\ \frac{dN_{2g}}{dt} &= -\Phi_g \sigma_g N_{2g}, \\ \frac{dN_{\text{gs}}}{dt} &= -\xi \Phi_g \sigma_{\text{gs}} N_{\text{gs}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma_g = \sigma_{\text{abs}}^g + \sigma_{\text{cm}}^g$ – эффективное сечение для излучения на частоте генерации; $N_{2g} = N_2 - \beta_g N$ – эффективная населенность верхнего мультиплета для излучения на частоте генерации; $\beta_g = \sigma_{\text{abs}}^g / (\sigma_{\text{abs}}^g + \sigma_{\text{cm}}^g)$ – параметр, характеризующий условие достижения состояния просветления на частоте генерации; $\Phi_g = I_g / (h\nu_g)$ – плотность потока фотонов на частоте генерации; $k_L^* = k_L + k_{\text{sa}}$.

Система уравнений (2) аналогична системам уравнений, используемых для описания работы лазеров на основе четырехуровневых активных сред в режиме ПМД и «медленного» пассивного модулятора, решения которых хорошо известны [4]. В нашем случае эти решения по форме будут аналогичными, изменится только смысл некоторых величин.

Выражение для Φ_g как функции от N_{2g} имеет вид

$$\begin{aligned} \Phi_g(N_{2g}) &= \frac{c\mu}{n} \left\{ N_{2g}^i - N_{2g} - \frac{k_L l_a + \beta \ln(1/T_0)}{l_a \sigma_g} \ln \left(\frac{N_{2g}^i}{N_{2g}} \right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1-\beta) \ln(1/T_0)}{l_a \sigma_g \alpha} \left[1 - \left(\frac{N_{2g}}{N_{2g}^i} \right)^\alpha \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\alpha = \xi \sigma_{\text{gs}} / \sigma_g; \beta = \sigma_{\text{es}} / \sigma_{\text{gs}}; N_{2g}^i = (k_L l_a - \ln T_0) / (\sigma_g l_a);$$

$T_0 = \exp(-\sigma_{\text{gs}} N_{\text{sa}} l_{\text{sa}})$ – начальное пропускание насыщаю-

щегося поглотителя. Максимальное значение Φ_g достигается при некоторой эффективной населенности $N_{2g} = N_{2g}^t$, которая определяется из уравнения

$$\frac{N_{2g}^t}{N_{2g}^i} = \frac{N_{2g}^0}{N_{2g}^i} + \left(1 - \frac{N_{2g}^0}{N_{2g}^i} \right) \left(\frac{N_{2g}^t}{N_{2g}^i} \right)^\alpha. \quad (4)$$

Здесь $N_{2g}^0 = (k_L l_a - \beta \ln T_0) / (l_a \sigma_g)$. Значение $N_{2g} = N_{2g}^f$, которое соответствует окончанию импульса генерации, находим из уравнения

$$1 - \frac{N_{2g}^f}{N_{2g}^i} + \frac{N_{2g}^0}{N_{2g}^i} \ln \left(\frac{N_{2g}^f}{N_{2g}^i} \right) - \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{N_{2g}^0}{N_{2g}^i} \right) \left[1 - \left(\frac{N_{2g}^f}{N_{2g}^i} \right)^\alpha \right] = 0. \quad (5)$$

Энергия импульса генерации на выходе лазера

$$E_{\text{out}} = V_g k_{\text{act}} h\nu_g \frac{1}{\sigma_g} \ln \left(\frac{N_{2g}^i}{N_{2g}^f} \right), \quad (6)$$

где V_g – эффективный объем моды генерируемого излучения; $k_{\text{act}} = -\ln R_{\text{out}} / (2l_a)$ – активные потери резонатора. Величина $\Phi_g(N_{2g}^t)$ – максимальное значение плотности потока фотонов, которое определяет пиковую мощность светового импульса на выходе лазера:

$$P_{\text{out}}^{\text{peak}} = V_g k_{\text{act}} h\nu_g \Phi_g(N_{2g}^t). \quad (7)$$

Длительность импульса генерации t_{dur} рассчитаем по формуле

$$t_{\text{dur}} = E_{\text{out}} / P_{\text{out}}^{\text{peak}}. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим работу лазера в режиме модулированной добротности между импульсами генерации. Будем считать, что пассивный модулятор полностью восстанавливается за промежуток времени между двумя соседними импульсами. Излучение накачки должно обеспечить увеличение средней по объему эффективной населенности на верхнем мультиплете от $N_{2g} = N_{2g}^f$ до $N_{2g} = N_{2g}^i$. Считаем, что излучение накачки распространяется по активному элементу вдоль оси z от $z = 0$ на входе в активный элемент до $z = l_a$ на выходе из него. Взаимодействие излучения накачки с активной средой описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{n}{c} \frac{\partial \Phi_p(t, z)}{\partial t} + \frac{\partial \Phi_p(t, z)}{\partial z} = -k_p(t, z) \Phi_p(t, z), \quad (9)$$

$$k_p(t, z) = \sigma_{\text{abs}}^p N - \sigma_p N_2(t, z). \quad (10)$$

В уравнениях (9) и (10) перейдем к средним по объему активного элемента величинам и получим систему уравнений для описания работы лазера между импульсами генерации:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_p(t)}{dt} &= -\frac{c}{n} k_p(t) \Phi_p(t) \\ &\quad - \frac{c}{n l_a} \Phi_{p0}(t) \{ \exp[-k_p(t) l_a] - 1 \}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{dk_p(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} \left\{ k_p(t) \left[1 + \frac{\Phi_p(t)}{\Phi_{\text{ps}}} \right] - \sigma_{\text{abs}}^p N \right\}. \quad (12)$$

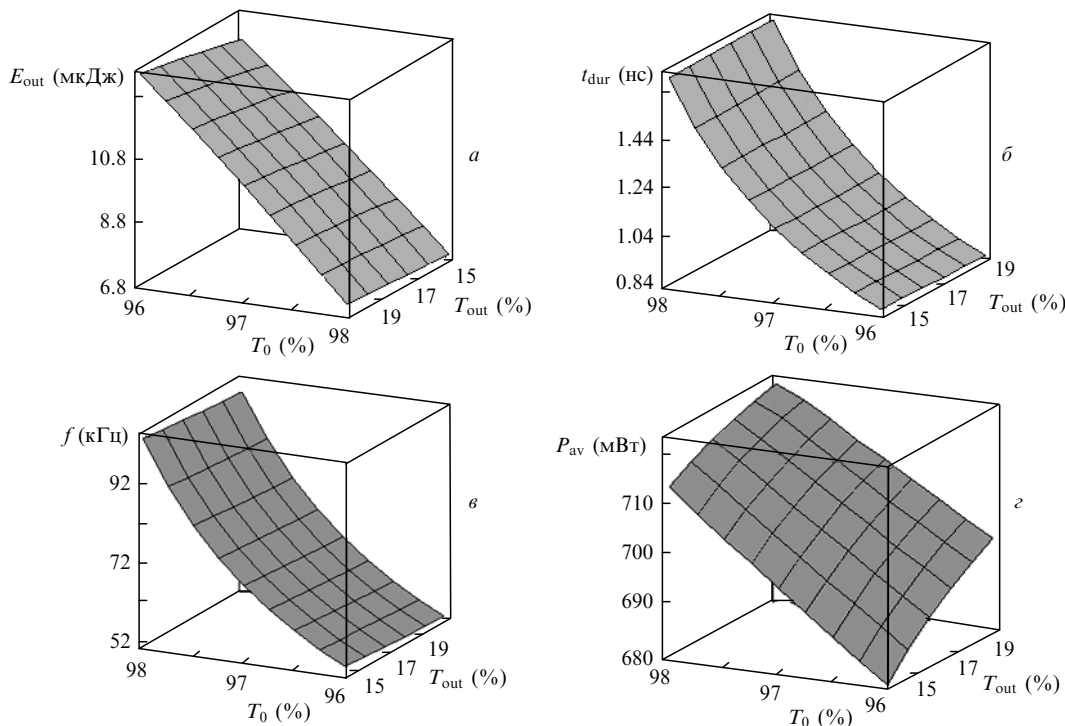


Рис.1. Расчетные генерационные параметры микрочип-лазера: зависимости выходной энергии E_{out} (а), длительности лазерного импульса t_{dur} (б), частоты следования импульсов f (в) и средней выходной мощности лазера P_{av} (г) от начального пропускания насыщающегося поглотителя T_0 и пропускания выходного зеркала T_{out} .

Здесь $\Phi_{ps} = 1/(\sigma_p \tau)$ – плотность насыщения потока фотонов на частоте излучения накачки. Поскольку интенсивность накачки на входе в активный элемент полагается постоянной, то $\Phi_{p0}(t) = \Phi_{p0} = P_{p0}/(A_p h \nu_p) = \text{const}$, где P_{p0} – мощность накачки на входе в активный элемент, а A_p – эффективная площадь пучка излучения накачки. В общем случае система уравнений (11) и (12) решается численно. В некоторых случаях, например при большой частоте следования импульсов генерации, когда начальная эффективная населенность $N_{2g} = N_{2g}^i$ не отличается существенно от конечной $N_{2g} = N_{2g}^f$, можно считать, что $\Phi_p(t) \approx \bar{\Phi}_p = \text{const}$, и из (12) можно получить выражение для частоты следования лазерных импульсов:

$$f = \left(\frac{\tau \ln \frac{ak_p^f + b}{ak_p^i + b}}{a} \right)^{-1}. \tag{13}$$

Здесь

$$a = 1 + \bar{\Phi}_p / \Phi_{ps}; \quad b = -\sigma_{abs}^p N; \quad k_p^f = (N - N_2^f) \sigma_{abs}^p - N_2^f \sigma_{em}^p;$$

$$k_p^i = (N - N_2^i) \sigma_{abs}^p - N_2^i \sigma_{em}^p;$$

населенности верхнего мультиплета N_2^f и N_2^i соответствуют эффективным населенностям N_{2g}^f и N_{2g}^i . При однократном проходе излучения накачки через активный элемент величину $\bar{\Phi}_p$ рассчитаем по формуле

$$\bar{\Phi}_p = \Phi_{p0} [1 - \exp(-\bar{k}_p l_a)] / (\bar{k}_p l_a), \tag{14}$$

$$\text{где } \bar{k}_p \approx (k_p^f + k_p^i) / 2.$$

Поскольку целью данной работы является создание лазера, генерирующего световые импульсы малой длительности, то для моделирования был выбран микрочип-

лазер, состоящий из активного элемента YAG:Yb (концентрация Yb 10 %) толщиной 0.8 мм и пассивного Cr:YAG-модулятора толщиной 0.2 мм, находящихся в оптическом контакте. Расчеты проводились по формулам (4)–(8), (13) и (14). Средняя мощность выходного излучения рассчитывалась как $P_{av} = E_{out} \cdot f$. Лазер накачивался по продольной схеме, излучение накачки фокусировалось в активный элемент в пятно диаметром ~ 100 мкм. Мощность накачки на входе в активный элемент $P_{p0} = 3.4$ Вт. Параметры насыщающегося поглотителя были следующими: $\tau_{sa} = 3.4$ мкс, $\sigma_{gs} = 4.3 \times 10^{-18}$ см², $\sigma_{es} = 8.9 \times 10^{-19}$ см². Время жизни верхнего лазерного уровня Yb, сечения поглощения и стимулированного излучения были взяты из работ [5, 6]. При расчетах учитывалось спектральное распределение мощности излучения лазерного диода в области 940 нм, что приводит к изменению эффективных сечений для излучения накачки [7]. Результаты расчетов показаны на рис.1.

Как видно из представленных результатов, начальное пропускание затвора в наибольшей степени влияет на выходные характеристики лазера. Для работы с частотой следования лазерных импульсов ~ 100 кГц пропускание выходного зеркала должно составлять примерно 20 %, а начальное пропускание затвора – примерно 98 %. При этом пиковая мощность достигает более 3 кВт. Расчеты показывают, что при уменьшении начального пропускания насыщающегося поглотителя до 96.5 % пиковая мощность возрастает до ~ 10 кВт при уменьшении частоты следования импульсов до ~ 62 кГц.

3. Экспериментальная часть

В экспериментах использовались две конфигурации резонатора лазера – для многомодовой и одномодовой генерации (по продольным модам резонатора).

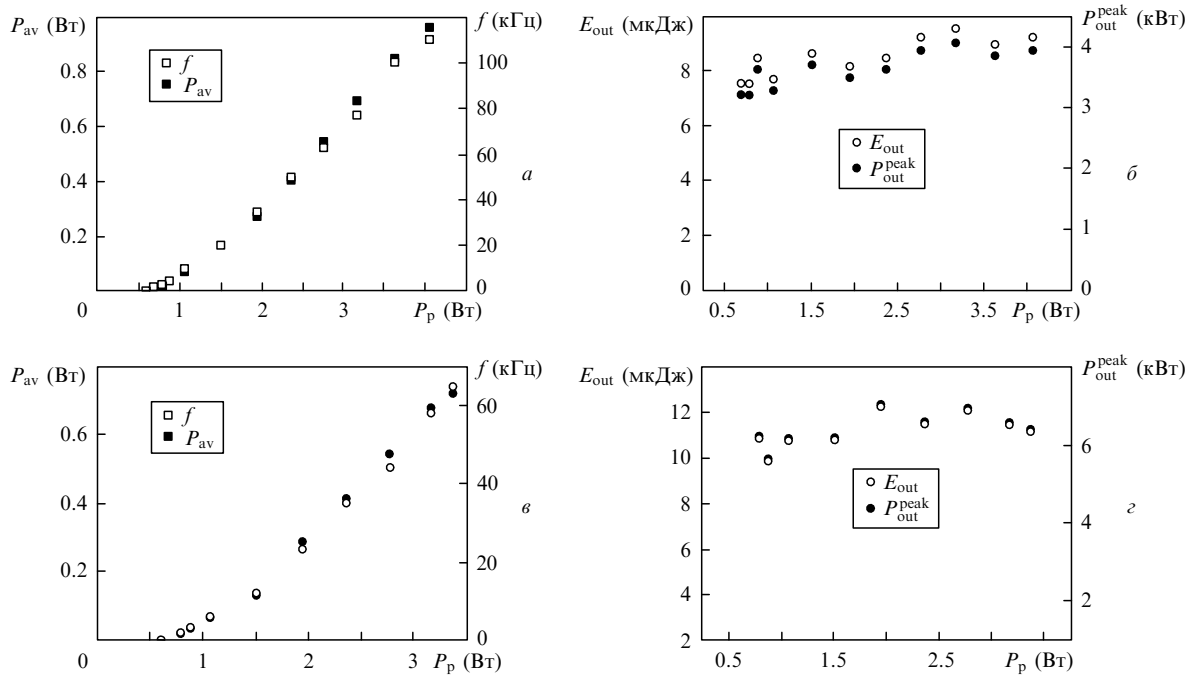


Рис.2. Зависимости выходных параметров Yb : YAG-лазера от мощности накачки P_p в многомодовом режиме генерации при $T_0 = 98\%$ (а, б) и 96.5% (в, з).

Для многомодовой генерации резонатор микрочип-лазера формировался плоским высокоотражающим зеркалом и плоским выходным зеркалом, нанесенными на одну из граней активного элемента (YAG : Yb) и пассивного затвора (YAG : Cr) соответственно. Лазерный диод с волоконным выводом излучения и максимальной выходной мощностью 6 Вт на длине волны 940 нм использовался в качестве источника накачки. Фокусирующая система формировала пучок накачки с диаметром перетяжки в активном элементе около 100 мкм. Кристаллы YAG : Cr находились в оптическом контакте с активным элементом YAG : Yb. Все кристаллы YAG : Cr были вырезаны вдоль оси [001]. Толщина микрочип-лазера составляла ~ 1 мм.

Для получения одномодового режима генерации в резонатор лазера вводились два эталона Фабри – Перо. Эти эталоны были сформированы кристаллом YAG : Cr и воздушным промежутком между кристаллами YAG : Yb и YAG : Cr.

В случае многомодовой генерации спектр выходного излучения состоял из четырех-пяти соседних продольных мод резонатора. Для пассивного затвора с начальным пропусканием $T_0 = 98\%$ получены лазерные импульсы с энергией 8 мкДж, длительностью 1.9 нс (пиковая мощность 4.2 кВт), частотой следования 100 кГц и средней выходной мощностью ~ 0.8 Вт (длина волны ~ 1029.7 нм).

Для лазера с пропусканием $T_0 = 96.5\%$ получены лазерные импульсы с энергией 11.1 мкДж, длительностью менее 1.5 нс (пиковая мощность свыше 7 кВт) и частотой следования 65 кГц (длина волны ~ 1029.7 нм). Максимальная средняя выходная мощность составила ~ 0.72 Вт при нестабильности амплитуды импульсов ~ 4%, временном джиттере (разбросе временных интервалов между соседними импульсами) менее 2 мкс и частоте следования 65 кГц. Зависимости выходной мощности, частоты следования, пиковой мощности и энергии импульсов от мощности накачки приведены на рис.2. Цуг импульсов представлен на рис.3. При дальнейшем повышении мощ-

ности накачки наблюдалось значительное увеличение нестабильности амплитуды и частоты следования импульсов.

Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем согласии с расчетными данными. Небольшое несоответствие измеренной и расчетной длительностей импульсов, особенно для оптически более плотного затвора связано с ограниченным временным разрешением (~ 1.7 нс) измерительного оборудования.

В одномодовом режиме генерации при мощности накачки 2.95 Вт и $T_0 = 96.5\%$ средняя выходная мощность лазера составила 620 мВт при оптической эффективности генерации ~ 21%. Энергия моноимпульса была равна 12.9 мкДж при его длительности менее 2 нс (пиковая мощность 6.8 кВт) на длине волны 1029 нм. Максимальная частота следования импульсов в этих условиях составляла 50 кГц. При использовании насыщающегося поглотителя с $T_0 = 98\%$ средняя выходная мощность достигала 450 мВт при энергии импульсов 4.25 мкДж,

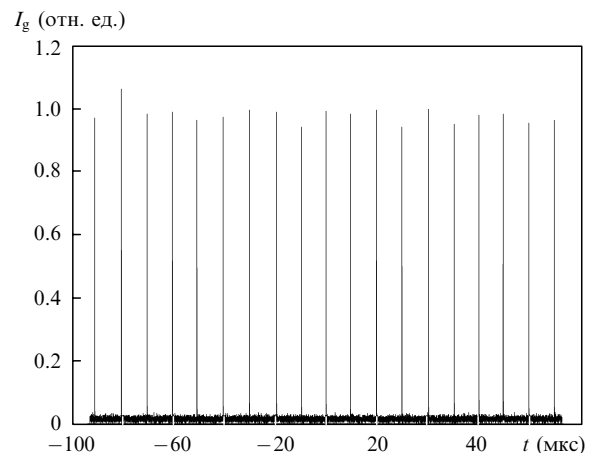


Рис.3. Цуг импульсов Yb : YAG-лазера в многомодовом режиме генерации.

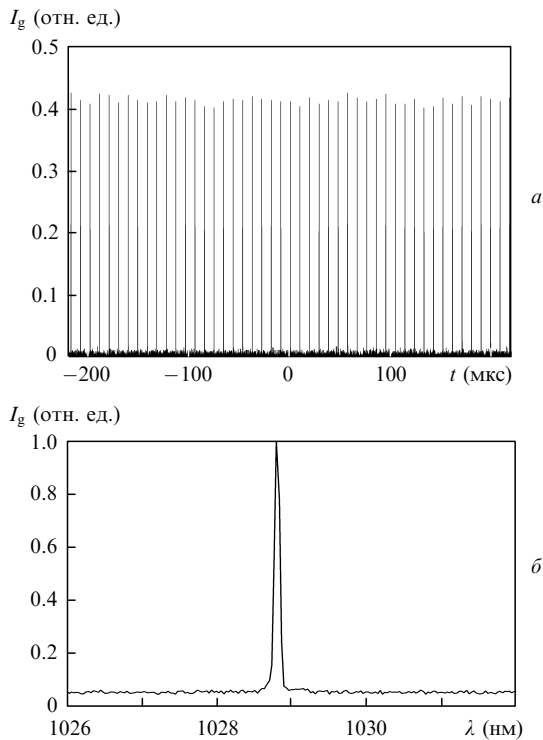


Рис.4. Цуг импульсов Yb:YAG-лазера в режиме генерации одной продольной моды резонатора (а) и спектр выходного излучения одномодового Yb:YAG-лазера (б).

их длительности 2.8 нс (пиковая мощность 1.52 кВт) и частоте следования 106 кГц на длине волны 1029 нм. Цуг импульсов и спектр выходного излучения представлены на рис.4. Нестабильность амплитуды импульсов не превышала 2%, а временной джиттер составлял не более 1 мкс при частоте следования 106 кГц.

В случае как многомодовой, так и одномодовой генерации выходное излучение Yb:YAG-лазера было линейно поляризовано параллельно кристаллографической оси [100] пассивного затвора на основе кристалла YAG:Cr.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена модификация системы балансных уравнений для квазитрехуровневых лазеров, работающих в режиме ПМД с «медленным» насыщающимся поглотителем, проведены расчеты оптимальных параметров микроchip-лазера на YAG:Yb с пассивным Cr:YAG-модулятором при частоте следования импульсов ~ 100 кГц. Экспериментально продемонстрирована генерация в микролазере на YAG:Yb–YAG:Cr на одной продольной моде резонатора с частотой следования импульсов свыше 100 кГц, средней выходной мощностью 0.45 Вт и пиковой мощностью 1.5 кВт. Импульсы с пиковой мощностью 4.2 кВт, со средней выходной мощностью 0.8 Вт и частотой следования 100 кГц получены в многомодовом режиме генерации.

1. Zayhowski J.J., Dill C. *Opt. Lett.*, **19**, 1427 (1994).
2. Keller U., Weingarten K.J., Kärtner F.X., Kopf D., Braun B., Jung I.D., Fluck R., Hönninger C., Matuschek N., Aus der Au J. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 435 (1996).
3. Forget S., Druon F., Balembois F., Georges P., Landru N., Fève J.-P., Lin J., Weng Z. *Opt. Commun.*, **259**, 816 (2006).
4. Zhang X., Zhao S., Wang Q., Zhang Q., Sun L., Zhang S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 2286 (1997).
5. Sumida D.S., Fan T.Y. *Opt. Lett.*, **20**, 2384 (1995).
6. Patel F.D., Honea E.C., Speth J., Payne S.A., Hutcheson R., Equall R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37**, 135 (2001).
7. Ясюкевич А.С., Мандрик А.В., Трошин А.Е., Кулешов Н.В. *ЖЭС*, **74**, 55 (2007).