

Внутрирезонаторная ВКР-генерация в полифункциональном лазерном кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ при диодной накачке

Т.Т.Басиев, С.Н.Сметанин, А.В.Федин, А.С.Шурыгин

Исследована генерация миниатюрного полностью твердотельного ВКР-лазера на кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с пассивным затвором на $\text{LiF}:\text{F}_2^-$. Экспериментально и теоретически исследованы зависимости параметров лазерной генерации и ВКР-самопреобразования лазерного излучения от начального пропускания пассивного лазерного затвора. Проведено моделирование кинетики генерации, показавшее возможность нелинейной разгрузки резонатора при высокоэффективном ВКР-самопреобразовании лазерного излучения. Увеличение длины активной лазерной среды от 1 до 3 мм позволило увеличить энергию выходного ВКР-излучения от 20 мкДж до рекордного среди подобных ВКР-лазеров значения 60 мкДж на длине волны 1.17 мкм при поглощенной энергии многомодовой диодной накачки 3.7 мДжс.

Ключевые слова: полностью твердотельный лазер, вынужденное комбинационное рассеяние, самопреобразование частоты, нелинейная разгрузка резонатора.

1. Введение

В настоящее время наблюдается прогресс в технологии создания полностью твердотельных лазеров, что обусловлено широким использованием диодной накачки и пассивных методов управления параметрами лазерного излучения, т. к. они не требуют высоковольтных и высокочастотных источников питания и управления. Большой интерес представляют лазеры на неодимовых кристаллах с пассивной модуляцией добротности и преобразованием частоты лазерного излучения при вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) [1, 2]. При этом особое место занимают компактные полностью твердотельные лазеры, в которых один и тот же неодимовый кристалл является не только инвертированной, но и активной лазерной ВКР-средой. Известен ряд таких уникальных кристаллов: вольфраматы $\text{BaWO}_4:\text{Nd}$, $\text{PbWO}_4:\text{Nd}$ и $\text{SrWO}_4:\text{Nd}$ [3], двойные вольфраматы $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}$ и $\text{KY}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}$ [4], ванадаты $\text{YVO}_4:\text{Nd}$ и $\text{GdVO}_4:\text{Nd}$ [5], а также молибдаты $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}$ и $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}$ [6, 7].

В работе [7] продемонстрирован новый компактный ВКР-лазер на кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}$ с накачкой излучением одномодового лазерного диода мощностью 2 Вт и управляемой градиентно окрашенным кристаллом $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ пассивной модуляцией добротности. Энергия повторяющихся (с частотой порядка нескольких килогерц) наносекундных импульсов выходного ВКР-излучения достигала 21 мкДж, что соответственно в 6 и 3.5 раза больше, чем для $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ - и $\text{Nd}:\text{PbMoO}_4$ -лазеров аналогичной конструкции [5, 6]. Данный результат обус-

ловлен, во-первых, хорошими лазерными характеристиками кристалла $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}$ [7] – коэффициентом поглощения излучения диодной накачки ($\lambda_p = 0.804$ мкм) $k_{12} \approx 5 \text{ см}^{-1}$ при концентрации Nd^{3+} около 1 ат. %, сечением вынужденного излучения $\sigma_{21} = 3 \times 10^{-19} \text{ см}^2$ и временем жизни верхнего лазерного уровня $\tau = 180$ мкс, сравнимыми с таковыми для кристалла $\text{YAG}:\text{Nd}$, а во-вторых, высоким коэффициентом ВКР-усиления $g = 5.7 \text{ см/ГВт}$, сравнимым с таковым для кристаллов YVO_4 и GdVO_4 .

В настоящей работе представлены результаты исследования генерации миниатюрного ВКР-лазера на кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с пассивным затвором на $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ при использовании многомодовой диодной накачки мощностью 12 Вт.

2. Оптическая схема лазера

На рис.1 приведены фотография экспериментального стенда и оптическая схема исследуемого ВКР-лазера. Лазерная система состоит из источника многомодовой диодной накачки 1 с длиной волны излучения $\lambda_p = 804$ мкм, мощностью $P = 12$ Вт, длительностью импульса 500 мкс и оптоволоконным выводом (коммерческий модуль Puma-805-15-FC-TEC); фокусирующего объектива 2; активного элемента 3 на кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с отражающим покрытием на одной из граней и просветляющим покрытием на другой для лазерного и ВКР-излучения (покрытия пропускают излучение накачки); пассивного лазерного затвора 4 на кристалле $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ с начальным пропусканием $T_0 = 55\% - 90\%$; концевых и выходных зеркал с коэффициентами отражения $\sim 99\%$ для лазерного ($\lambda_g = 1.06$ мкм) и ВКР-излучения ($\lambda_s = 1.17$ мкм) и с коэффициентом отражения $\sim 10\%$ для излучения накачки ($\lambda_p = 0.804$ мкм).

В качестве активного элемента (АЭ) использовались кристаллы $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ длиной $L_a = 1$ и 3 мм с коэффициентами поглощения излучения накачки $k_{12} = 6 \text{ см}^{-1}$ (1.2 ат. % Nd^{3+}) и 3.5 см^{-1} (0.7 ат. % Nd^{3+}) соответственно (далее АЭ 1 и АЭ 2).

Т.Т.Басиев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru
С.Н.Сметанин, А.В.Федин, А.С.Шурыгин. Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, Владимирская обл., 601910 Ковров, ул. Маяковского, 19; e-mail: smetanin@bk.ru

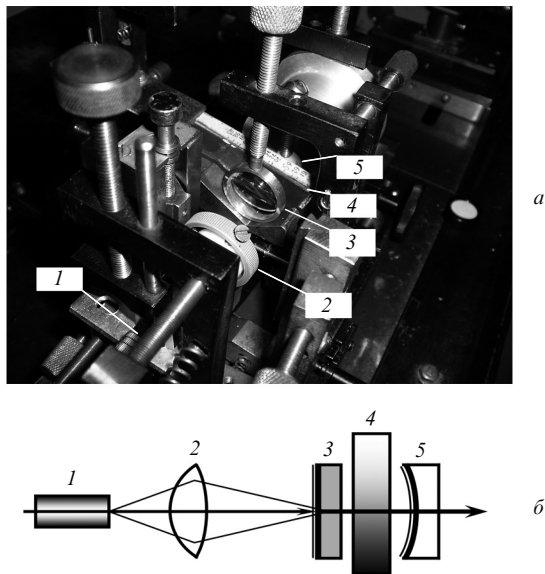


Рис. 1. Экспериментальный стенд (а) и оптическая схема лазера (б): 1 – диодный лазер; 2 – фокусирующий объектив; 3 – активный элемент ВКР-лазера; 4 – пассивный лазерный затвор; 5 – выходное вогнутое зеркало.

При фокусировке излучения накачки в пятно радиусом 240 мкм в середине АЭ мы получили усредненный по его длине радиус пучка накачки 250 мкм для АЭ 1 и 320 мкм для АЭ 2.

В качестве выходного зеркала использовались вогнутые зеркала с радиусами кривизны 50, 100, 200 и 500 мм. Наибольшая (24 %) эффективность преобразования поглощенного излучения накачки в лазерное излучение в режиме одномодовой свободной генерации наблюдалась при использовании выходного зеркала с радиусом кривизны 200 мм, поэтому оно и было выбрано для дальнейших исследований.

3. Расчет параметров генерации ВКР-лазера

Проведем теоретическую оценку порога ВКР-самопреобразования лазерного излучения. Параметры лазерной генерации в режиме модуляции добротности можно рассчитать по формулам [8]

$$U_{1.06} \approx \frac{k_0}{k_1} U_s \ln \frac{1}{R_{1.06}},$$

$$I_{1.06} \approx \frac{c}{n} k_0 U_s \left[1 - \frac{k_1}{k_0} \left(1 + \ln \frac{k_0}{k_1} \right) \right] \ln \frac{1}{R_{1.06}}, \quad (1)$$

$$\tau_{1.06} \approx \frac{U_{1.06}}{I_{1.06}},$$

где $U_{1.06}$, $I_{1.06}$ и $\tau_{1.06}$ – плотность энергии, пиковая интенсивность и длительность импульса выходного лазерного излучения на длине волны $\lambda_g = 1.06$ мкм соответственно; c – скорость света; n – показатель преломления лазерной среды; U_s – плотность энергии насыщения усиления АЭ; $R_{1.06}$ – коэффициент отражения выходного зеркала для лазерного излучения;

$$k_{0,1} = \frac{1}{L_r} \ln \frac{1}{\sqrt{R_{1.06} T_{0,1}}} \quad (2)$$

– коэффициенты распределенных потерь для лазерного резонатора при непросветленном и просветленном состоянии пассивного лазерного затвора (ПЛЗ) соответственно; $T_{0,1}$ – пропускания ПЛЗ в непросветленном и просветленном состояниях (параметры $T_{0,1}$ формально могут описывать и другие потери, например потери в АЭ); L_r – оптическая длина резонатора. Для оценки порога внутррезонаторного ВКР-самопреобразования необходимо знать длительность $\tau_{1.06}$ импульса лазерного излучения и его внутррезонаторную интенсивность

$$I_{1.06}^* \approx I_{1.06} / \ln \frac{1}{R_{1.06}}. \quad (3)$$

Хорошо известно пороговое условие однопроходного ВКР-преобразования лазерного излучения в излучение первой стоксовой компоненты [1]

$$g I_{th} L_a \approx 25, \quad (4)$$

где I_{th} – пороговая интенсивность лазерного излучения в случае однопроходного ВКР. Данное условие можно переписать для внутррезонаторного ВКР-преобразования лазерного излучения с учетом потерь в резонаторе и длительности лазерного излучения:

$$(g_r I_{1.06}^{th} - k_{1.17}) z_{1.06} \approx 25, \quad (5)$$

где $I_{1.06}^{th}$ – пороговая интенсивность лазерного излучения внутри резонатора; $g_r = g L_a / L_r$ – распределенный по длине резонатора коэффициент ВКР-усиления; $z_{1.06} = \tau_{1.06} c$ – пространственная длительность импульса лазерного излучения;

$$k_{1.17} = \frac{1}{L_r} \ln \frac{1}{\sqrt{R_{1.17} T_1}} \quad (6)$$

– коэффициент распределенных потерь лазерного резонатора для ВКР-излучения; $R_{1.17}$ – коэффициент отражения выходного зеркала резонатора для ВКР-излучения на $\lambda_s = 1.17$ мкм.

С другой стороны, можно считать, что помещение ВКР-среды в резонатор приводит к увеличению эффективной длины ВКР-взаимодействия [9]

$$L_{eff} = L_a N_{eff}, \quad (7)$$

где N_{eff} – эффективное число проходов ВКР-излучения по резонатору. При этом, заменив в (4) L_a на L_{eff} , получаем пороговую интенсивность лазерного излучения внутри резонатора

$$I_{1.06}^{th} \approx \frac{25}{g L_a N_{eff}}. \quad (8)$$

Поскольку отношение интенсивностей I_{th} из (4) и $I_{1.06}^{th}$ (8) равно N_{eff} , то, используя условие (5), приходим к выражению

$$N_{eff} = \frac{I_{th}}{I_{1.06}^{th}} \approx \left[\frac{L_r}{\tau_{1.06} c} - \frac{\ln(\sqrt{R_{1.17} T_1})}{25} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (8) дает пороговую интенсивность $I_{1.06}^{th}$, которую мы сравниваем с имеющейся в нашем лазере ин-

тенсивностью $I_{1.06}^*$ из (3). При $I_{1.06}^* = I_{1.06}^{\text{th}}$ достигается порог ВКР-самопреобразования лазерного излучения, которому соответствует расчетное пороговое начальное пропускание ПЛЗ T_0^{th} .

Расчет при входных параметрах $T_1 = 95\%$, $L_r = 2$ см, $U_s = \hbar\omega_g/\sigma_{21} = 0.621$ Дж/см² для высокодобротного резонатора ($R_{1.06} = R_{1.17} = 99\%$) и короткого (1 мм) АЭ 1 дает максимальное пороговое начальное пропускание ПЛЗ $T_0^{\text{th}} = 75\%$. Уменьшение коэффициентов отражения выходного зеркала резонатора $R_{1.06}$ и $R_{1.17}$ по-разному влияет на T_0^{th} . Так, уменьшение $R_{1.17}$ до 70% при сохранении $R_{1.06} = 99\%$ слабо изменяет пороговое начальное пропускание ПЛЗ – $T_0^{\text{th}} = 71\%$, а уменьшение $R_{1.06}$ до 70% при сохранении $R_{1.17} = 99\%$ приводит к сильному уменьшению T_0^{th} – до 40%.

Использование более длинного (3 мм) АЭ 2 при тех же входных параметрах T_1 , L_r , U_s и при $R_{1.06} = R_{1.17} = 99\%$ приводит к увеличению максимального расчетного порогового начального пропускания ПЛЗ T_0^{th} до 89%. Уменьшение $R_{1.17}$ до 70%, как и в предыдущем случае, слабо изменяет порог ВКР – $T_0^{\text{th}} = 86\%$, но уменьшение $R_{1.06}$ до 70% не столь сильно снижает пороговое начальное пропускание ПЛЗ – $T_0^{\text{th}} = 80\%$.

Поскольку уменьшение начального пропускания ПЛЗ ограничено порогом генерации лазерного излучения, наиболее выгодным для ВКР-лазера является использование более длинного АЭ 2 и высокодобротного резонатора для лазерного излучения ($R_{1.06} = 99\%$). В этом случае T_0^{th} , определяющее порог ВКР, достаточно велико ($T_0^{\text{th}} = 86\% - 89\%$) при $R_{1.17} = 70\% - 99\%$. При этом мы можем уменьшать начальное пропускание ПЛЗ $T_0 < T_0^{\text{th}}$ вплоть до значения, соответствующего порогу лазерной генерации, что увеличивает превышение порога ВКР и эффективность ВКР-генерации.

Важно отметить, что, как для АЭ 1, так и для АЭ 2 в диапазоне $R_{1.17} = 70\% - 99\%$ значения T_0^{th} изменяются очень слабо и близки к максимальным, что дает возможность эффективной разгрузки резонатора при ВКР-самопреобразовании лазерного излучения, если $R_{1.17} < R_{1.06}$.

Нами была построена математическая модель рассматриваемого ВКР-лазера на основе балансных уравнений [10] с учетом ВКР-преобразования лазерного излучения [11] непосредственно в активной среде. При этом полная система уравнений для Nd³⁺:SrMoO₄-лазера с ПЛЗ на кристалле LiF:F₂⁻ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_a}{\partial t} &= -\sigma_{21a} N_a \frac{I_{1.06a}^+ + I_{1.06a}^-}{\hbar\omega_g} + \sigma_{12a} (N_{\text{Nd}} - N_a) \\ &\times \frac{P}{\pi r_p^2 \hbar\omega_p} - \frac{N_a}{\tau_a}, \\ \left(\pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_a} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_{1.06a}^{(\pm)} &= \sigma_{21a} N_a (I_{1.06a}^{(\pm)} + I_{\text{sp1}}) \\ &- k_a I_{1.06a}^{(\pm)} - g \frac{\lambda_s}{\lambda_g} (I_{1.17a}^{(+)} + I_{1.17a}^{(-)}) I_{1.06a}^{(\pm)}, \\ \left(\pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_a} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_{1.17a}^{(\pm)} &= -k_a I_{1.17a}^{(\pm)} \\ &+ g (I_{1.06a}^{(+)} + I_{1.06a}^{(-)}) (I_{1.17a}^{(\pm)} + I_{\text{sp2}}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_b}{\partial t} &= [\sigma_{12b} (N_F - N_b) - \sigma_{21b} N_b] \frac{I_{1.06b}^{(+)} + I_{1.06b}^{(-)}}{\hbar\omega_g} - \frac{N_b}{\tau_b}, \\ \left(\pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_b} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_{1.06b}^{(\pm)} &= -\sigma_{21b} (N_F - N_b) I_{1.06b}^{(\pm)} - k_b I_{1.06b}^{(\pm)}, \\ \left(\pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_b} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_{1.17b}^{(\pm)} &= -k_b I_{1.17b}^{(\pm)}, \end{aligned}$$

где $P = 12$ Вт – мощность излучения диодной накачки; r_p – усредненный радиус пучка диодной накачки в АЭ; $\hbar\omega_p$, $\hbar\omega_g$ и $\hbar\omega_s$ – энергии фотонов накачки, лазерного и ВКР-излучения соответственно; $I_{1.06a}^{(\pm)}$ и $I_{1.06b}^{(\pm)}$ – интенсивности лазерного излучения на $\lambda_g = 1.06$ мкм, распространяющегося вперед (+) и назад (-) по АЭ и ПЛЗ соответственно; $I_{1.17a}^{(\pm)}$ и $I_{1.17b}^{(\pm)}$ – то же для ВКР-излучения на $\lambda_s = 1.17$ мкм; I_{sp1} и I_{sp2} – интенсивности спонтанного лазерного и ВКР-излучения; N_a и N_b – концентрации частиц на верхних рабочих уровнях для АЭ и ПЛЗ соответственно; N_{Nd} и N_F – концентрации активных центров в АЭ и ПЛЗ соответственно; σ_{12a} и σ_{21a} – сечения поглощения и вынужденного излучения ионов Nd³⁺ в АЭ соответственно; σ_{12b} и σ_{21b} – то же для ПЛЗ; τ_a и τ_b – времена жизни верхних рабочих уровней для АЭ и ПЛЗ соответственно; k_a и k_b – коэффициенты вредных потерь в АЭ и ПЛЗ соответственно; v_a и v_b – скорости света в АЭ и ПЛЗ соответственно.

Система уравнений дополняется граничными условиями, соответствующими оптической схеме лазера (рис.1). Ключевым параметром, определяющим режим генерации, является начальное пропускание ПЛЗ

$$T_0 = \exp[-(\sigma_{12b} N_F - k_b) L_b], \quad (11)$$

где $L_b = 7$ мм – длина ПЛЗ.

На рис.2 приведены результаты численного расчета кинетики моноимпульсной лазерной и ВКР-генерации (один лазерный импульс за время действия накачки 500 мкс), наблюдающейся в наиболее жестком режиме модуляции добротности при $T_0 = 64\%$ для АЭ 1 (рис.2,а, в) и 55% для АЭ 2 (рис.2,б, г). Видно, что выходные импульсы излучения имеют модуляцию с периодом, равным времени двойного обхода резонатора (~0.14 нс), что связано с высокой добротностью резонатора ($R_{1.06} = 99\%$). При этом для ВКР-излучения характерна более глубокая модуляция импульса.

В случае короткого АЭ 1 и одинаковой добротности резонатора для лазерного и ВКР-излучения интенсивность импульса лазерного излучения больше интенсивности импульса ВКР-излучения, поэтому эффективность ВКР-самопреобразования оказывается невысокой (~28% по энергии) (рис.2,а).

Повысить эффективность ВКР-самопреобразования можно путем увеличения длины ВКР-среды (рис.2,б) и/или уменьшения $R_{1.17}$ по сравнению с $R_{1.06}$ (рис.2,в, г). Применению более длинного АЭ 2 (L_a в три раза больше) соответствует рис.2,б. Видно, что эффективность ВКР-самопреобразования возросла и превышает 50%. При этом длительность импульса ВКР-излучения оказывается в 1.5 раза меньше – около 1 нс, а его пиковая интенсивность почти в 4 раза больше – около 22 МВт/см².

На рис.2,в и г продемонстрированы наиболее эффективные режимы разгрузки резонатора при ВКР-само-

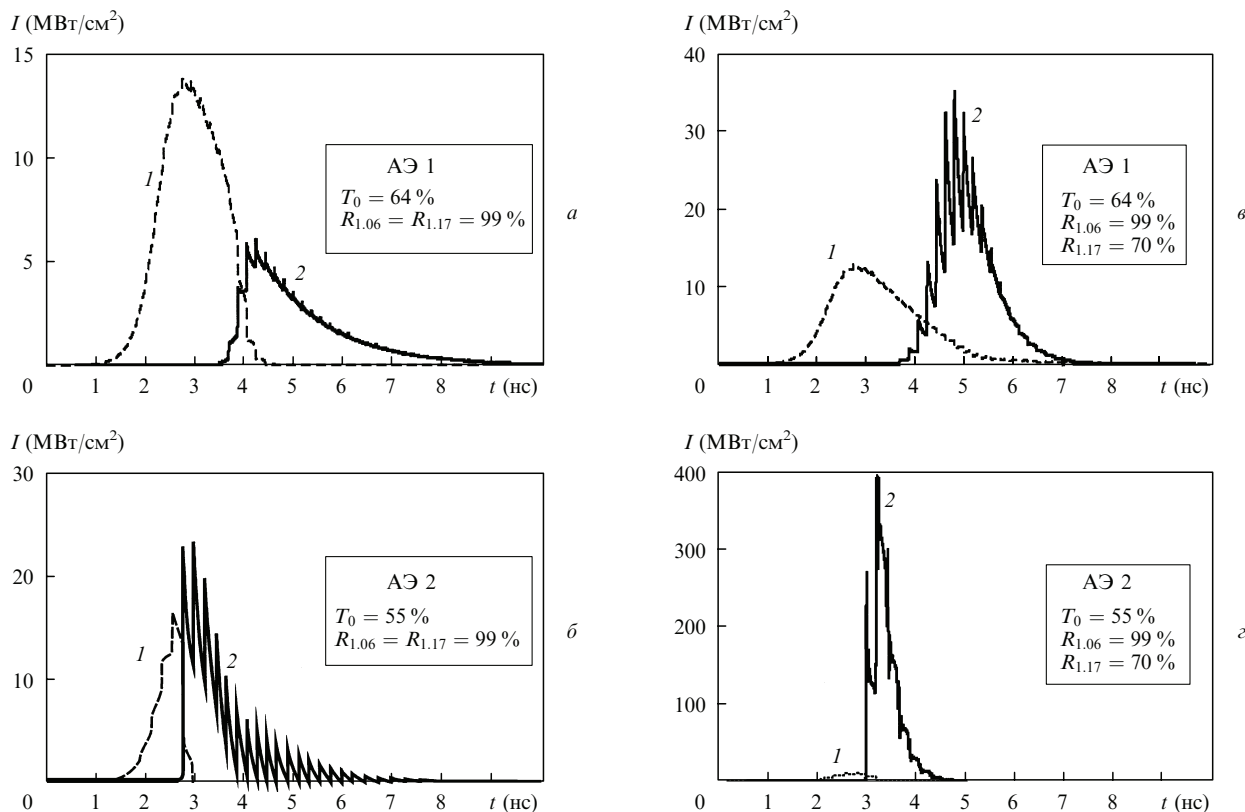


Рис.2. Результаты расчета интенсивности I генерации лазерного импульса (1) и ВКР-импульса (2) для АЭ 1 при $T_0 = 64\%$ (а, в) и АЭ 2 при $T_0 = 55\%$ (б, г), а также при $R_{1,06} = R_{1,17} = 99\%$ (а, б) и $R_{1,06} = 99\%$, $R_{1,17} = 70\%$ (в, г).

преобразовании лазерного излучения в АЭ 1 и АЭ 2 соответственно. Видно, что применение зеркала с $R_{1,17} = 70\%$ может привести к существенному увеличению выходных энергетических параметров ВКР-импульса. В случае использования АЭ 1 (рис.2,а) интенсивность ВКР-излучения возрастает до 36 МВт/см^2 (что в шесть раз больше, чем на рис.2,а) и длительность импульса уменьшается до 1 нс. Применение АЭ 2 при $R_{1,17} = 70\%$ (рис.2,г) позволяет рассчитывать на наилучшие выходные параметры ВКР-излучения – интенсивность 400 МВт/см^2 при длительности импульса 0.35 нс.

4. Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования энергетических лазерных характеристик проводились с использованием измерителя мощности и энергии Ophir. Временные параметры измерялись с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2А, подключенного к осциллографу Agilent (300 МГц).

На рис.3 представлены результаты экспериментальных исследований характеристик выходного излучения лазера в зависимости от начального пропускания ПЛЗ при использовании АЭ 1 и АЭ 2. Видно, что увеличение начального пропускания ПЛЗ T_0 приводит к уменьшению энергии W отдельных импульсов лазерного излучения (кривая 1), что обусловлено уменьшением контраста модуляции добротности (k_0/k_1 в выражении для $U_{1,06}$ в (1)). При этом растет частота повторения лазерных импульсов f (кривая 3) и, как следствие, увеличивается энергия цуга W_{tr} лазерных импульсов (кривая 4). Так, для АЭ 1 (рис.3,а) при $T_0 = 64\%$ и для АЭ 2 (рис.3,б) при $T_0 = 56\%$ генерируется только один лазерный импульс

за время действия накачки (500 мкс), что соответствует крайним левым точкам на кривых. Каждая следующая точка на кривых (при увеличении T_0) соответствует увеличению числа лазерных импульсов на единицу.

Из рис.3,а видно, что для АЭ 1 порог генерации ВКР-излучения достигается при $T_0 = 74\%$, когда генерируются пять лазерных импульсов в цуге. Это хорошо согласуется с теоретической оценкой – при $R_{1,17} = R_{1,06} = 99\%$ расчетное значение T_0^{th} достигает 75% . При уменьшении T_0 ($T_0 < 74\%$) наблюдается увеличение энергии отдельного импульса (кривая 2) и цуга импульсов (кривая 5) ВКР-излучения. Наибольшая энергия цуга импульсов ВКР-излучения 34 мкДж достигается при $T_0 = 67\%$, когда генерируются два импульса в цуге. Наибольшая энергия отдельного импульса ВКР-излучения 20 мкДж наблюдается в моноимпульсном режиме генерации при $T_0 = 64\%$. При этом энергия импульса лазерного излучения в четыре раза превышает энергию импульса ВКР-излучения, и временная картина импульса ВКР-генерации хорошо согласуется с полученной при математическом моделировании (рис.2,а).

Из рис.3,б видно, что для более длинного АЭ 2 порог ВКР достигается при $T_0 = 85\%$ (10 импульсов в цуге) и также хорошо согласуется с теоретической оценкой $T_0^{th} = 89\%$. Уменьшение T_0 ($T_0 < 85\%$) приводит к более стремительному росту энергии ВКР-импульса по сравнению со случаем использования АЭ 1. При этом наибольшая энергия отдельного импульса ВКР-излучения также наблюдается в моноимпульсном режиме, но достигает рекордного среди подобных ВКР-лазеров значения 60 мкДж . Максимальная энергия генерации цуга импульсов ВКР-излучения 78 мкДж достигается при $T_0 = 60\% - 65\%$ и генерации двух лазерных импульсов. Нужно от-

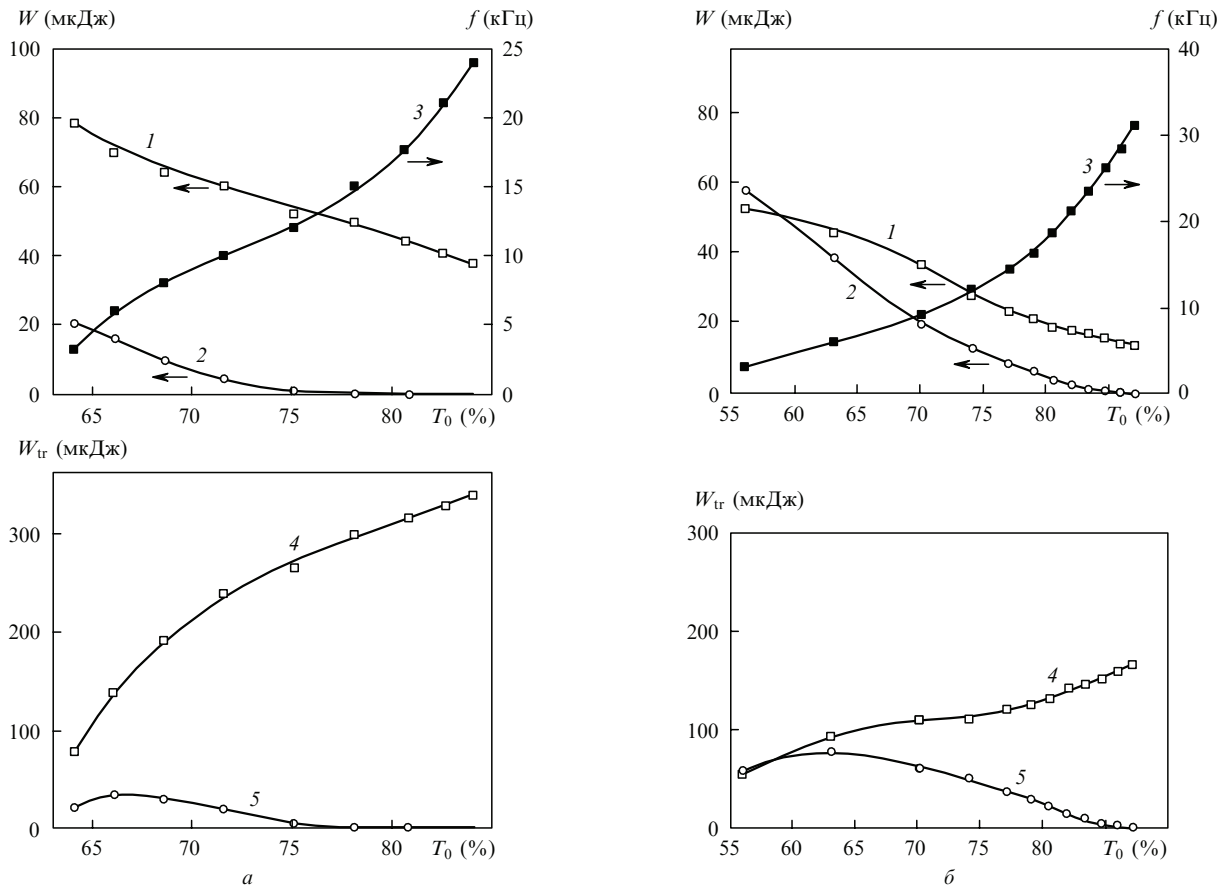


Рис.3. Экспериментальные зависимости характеристик выходного излучения ВКР-лазера от начального пропускания ПЛЗ для АЭ 1 (а) и АЭ 2 (б): энергии W отдельных импульсов лазерного (1) и ВКР-излучения (2), частота повторения f лазерных и ВКР-импульсов в цуге (3), а также энергии W_{tr} цуга импульсов лазерного (4) и ВКР-излучения (5).

метить, что при генерации одного-двух импульсов энергия ВКР-излучения становится равной энергии лазерного излучения, и временная картина импульса генерации согласуется с полученной при моделировании (рис.2,б). При уменьшении T_0 ($T_0 < 70\%$) хорошо видно (рис.3,б) уменьшение скорости роста энергии импульса лазерного излучения, что обусловлено истощением лазерного излучения при его эффективном ВКР-самопреобразовании.

Длительность генерируемых импульсов ВКР-излучения оказалась меньше предела разрешения нашей измерительной системы (менее 3 нс), но в режимах с менее оптически плотным ПЛЗ, когда генерируется только лазерное излучение, измеренная длительность импульсов, превышающая 3 нс, хорошо согласуется с результатами математического моделирования и теоретической оценкой по формулам (1). Представленные выше расчеты (рис.2,а и б) показали, что для режима наиболее жесткой (моноимпульсной) модуляции добротности, когда генерируется ВКР-излучение, длительность лазерных импульсов должна составлять ~ 1 нс. Здесь необходимо отметить, что прогнозируемые результаты моделирования, соответствующие рис.2,в и г, показывают возможность существенного (на порядок) увеличения энергии и мощности ВКР-излучения и уменьшения длительности генерируемых импульсов до сотен пикосекунд путем реализации нелинейной разгрузки резонатора при $R_{1,17} < R_{1,06}$. Экспериментальное исследование разгрузки резонатора при ВКР-самопреобразовании лазерного излучения будет предметом наших дальнейших работ. Предварительные экспериментальные результаты исследования

данного эффекта в кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}$ при маломощной накачке были представлены в работе [7].

В настоящей работе мы также экспериментально исследовали возможность усиления выходного ВКР-излучения. На выходе ВКР-лазера мы устанавливали дополнительный оптически плотный ($T_0 = 20\%$) кристалл $\text{LiF}:\text{F}_2^-$. Благодаря тому, что выходной пучок содержит лазерное и ВКР-излучение, данный кристалл может усиливать ВКР-излучение ($\lambda_s = 1.17$ мкм) под действием накачки лазерным излучением ($\lambda_g = 1.06$ мкм) [12]. Мы наблюдали увеличение энергии ВКР-излучения в 1.5–2 раза в случаях припорогового ВКР-преобразования в ВКР-лазере как с АЭ 1, так и с АЭ 2, но при эффективном ВКР-самопреобразовании усиление ВКР-излучения кристаллом $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ не наблюдалось. Однако нужно отметить принципиальную возможность применения данного ВКР-лазера в качестве задающего генератора для субнаносекундных лазерных усилительных $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ -систем.

5. Заключение

Таким образом, исследована генерация миниатюрного полностью твердотельного ВКР-лазера на кристалле $\text{SrMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с пассивным затвором на кристалле $\text{LiF}:\text{F}_2^-$.

Экспериментально и теоретически исследованы зависимости параметров лазерной генерации и ВКР-самопреобразования лазерного излучения от начального пропускания ПЛЗ. Проведено моделирование кинетики гене-

рации, показавшее возможность разгрузки резонатора при высокоэффективном ВКР-самопреобразовании лазерного излучения.

Увеличение длины активной среды ВКР-лазера от 1 до 3 мм в экспериментальной системе позволило повысить энергию выходного ВКР-излучения от 20 мкДж до рекордного среди подобных ВКР-лазеров значения 60 мкДж на длине волны 1.17 мкм при поглощенной энергии многомодовой диодной накачки 3.7 мДж. Длительность импульсов лазерного и ВКР-излучения составляет ~ 1 нс и может быть уменьшена в несколько раз при обеспечении нелинейной разгрузки резонатора ($R_{1,17} < R_{1,06}$), чему будут посвящены дальнейшие экспериментальные исследования данного лазера.

1. Басиев Т.Т. *УФН*, **169**, 1149 (1999).
2. Basiev T.T., Powell R.C., in *Handbook of Laser Technology and Applications* (Bristol–Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2004).
3. Басиев Т.Т., Осико В.В. *Успехи химии*, **75**, 939 (2006).
4. Grabtchikov A.S., Kuzmin A.N., Lisinetskii V.A., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 3742 (1999).
5. Basiev T.T., Vassiliev S.V., Konjushkin V.A., et al. *Laser Phys. Lett.*, **1**, 237 (2004).
6. Basiev T.T., Vassiliev S.V., Doroshenko M.E., et al. *Opt. Lett.*, **31**, 65 (2006).
7. Basiev T., Doroshenko M., Ivleva L., et al. *Opt. Lett.*, **34**, 1102 (2009).
8. Мак А.А., Сомс Л.Н., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М.: Наука, 1990).
9. Zverev P.G., Basiev T.T., Prokhorov A.M. *Opt. Mater.*, **11**, 335 (1999).
10. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 1990).
11. Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
12. Басиев Т.Т., Карасик А.Я., Конюшкин В.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 344 (2005).