

# Эффективное преобразование излучения Nd : YAG-лазера в безопасный для глаз спектральный диапазон при вынужденном комбинационном рассеянии в кристалле BaWO<sub>4</sub>

Т.Т.Басиев, М.Н.Басиева, А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, Л.И.Ивлева,  
В.В.Осико, С.Н.Сметанин, А.В.Федин

*Исследованы возможности повышения эффективности однокаскадной ВКР-генерации излучения с длиной волны 1.53 мкм в кристалле BaWO<sub>4</sub>, помещенном во внешний ВКР-резонатор, при накачке импульсным наносекундным излучением Nd : YAG-лазера с длиной волны 1.34 мкм. Найдены условия предотвращения оттока энергии во вторую стоксову ВКР-компоненту с длиной волны 1.78 мкм, что позволило повысить эффективность однокаскадной внутррезонаторной ВКР-генерации на длине волны 1.53 мкм вплоть до 60 %, а дифференциальный КПД ВКР-генерации – вплоть до квантового предела (~80 % при энергии импульсов ВКР-излучения до 20 мДж). Применение лазерной накачки цугами импульсов дало возможность увеличить энергию ВКР-излучения на длине волны 1.53 мкм до 40 мДж в цуге из трех импульсов.*

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, Nd : YAG-лазер, ВКР-резонатор, дифракционные потери.

## 1. Введение

Создание компактных твердотельных лазеров, эффективно работающих на длине волны ~1.5 мкм, безопасной для глаз и попадающей в «окна прозрачности» атмосферы и оптоволокна, представляет большой интерес для решения различных прикладных задач. При этом часто применяется [1] стоксов сдвиг частоты излучения традиционных неодимовых лазеров посредством вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Использование для этих целей кристалла нитрата бария Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, имеющего рекордный коэффициент ВКР-усиления, позволило повысить энергию импульсного наносекундного ВКР-излучения на длине волны ~1.5 мкм до 250 мДж при частоте повторения лазерных импульсов 1 Гц [2]. Однако данный кристалл гигроскопичен и обладает низкими термооптическими константами, что ограничивает его длительное применение, в особенности в случае повышения средней мощности лазерного излучения при увеличении частоты повторения лазерных импульсов. В этом плане наиболее конкурентоспособным является кристалл вольфрамата бария BaWO<sub>4</sub>, коэффициент ВКР-усиления которого приближается к таковому для кристалла Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и для длины волны излучения 1.34 мкм составляет 5.8 см × ГВт<sup>-1</sup> [3]. При этом кристалл BaWO<sub>4</sub> не гигроскопичен, тверд и обладает лучшими термооптическими свойствами по сравнению с известными ВКР-кристаллами [4].

ВКР-преобразование излучения Nd-лазеров в область длин волн ~1.5 мкм может осуществляться по од-

нокаскадной (в первую стоксову компоненту от длины волны 1.34 мкм) и трехкаскадной (в третью стоксову компоненту от длины волны 1.06 мкм) схемам. При этом ВКР-кристалл часто помещают в высокодобротный ВКР-резонатор для снижения порога ВКР-преобразования.

Трехкаскадная схема была реализована нами ранее в кристаллах Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> [5] и BaWO<sub>4</sub> [6] в ВКР-резонаторе при накачке Nd : YAG-лазером с длиной волны 1.064 мкм. При этом использование кристалла BaWO<sub>4</sub> позволило получить третью стоксову ВКР-компоненту (длина волны 1.51 мкм) со средней мощностью до 0.3 Вт при частоте повторения импульсов накачки 30 Гц и эффективности трехкаскадного ВКР-преобразования ~1 % [6].

Для реализации однокаскадной схемы ВКР-преобразования требуется генерация Nd-лазера на не основном лазерном переходе с длиной волны 1.34 мкм, что ограничивает достижимые энергетические характеристики лазера. Однако характеристики ВКР-преобразования при этом оказываются более высокими. В работе [7] исследовано ВКР-преобразование в кристалле BaWO<sub>4</sub> длиной 4 см, установленном во внешнем ВКР-резонаторе, при накачке Nd : YAG-лазером с длиной волны 1.34 мкм и энергией наносекундного лазерного импульса до 32 мДж. Для преодоления порога ВКР-преобразования интенсивность излучения накачки увеличивали путем его острой фокусировки в кристалл. Эффективность ВКР-преобразования в первую стоксову компоненту (длина волны 1.53 мкм) возросла до 6 %, но дальнейший рост эффективности генерации первой стоксовой компоненты был ограничен ее ВКР-преобразованием во вторую стоксову компоненту (длина волны 1.78 мкм) с такой же эффективностью (~5 %) при максимальной энергии накачки. При этом пороги ВКР-генерации первой и второй стоксовых компонент оказались близкими даже в том случае, когда коэффициент отражения (17%) зеркал ВКР-резонатора для второй стоксовой компоненты меньше, чем для первой (50 %). Таким образом, существует проблема

Т.Т.Басиев, М.Н.Басиева, Л.И.Ивлева, В.В.Осико. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: basiev@lst.gpi.ru

А.В.Гаврилов, М.Н.Ершков, С.Н.Сметанин, А.В.Федин. Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, Владимирская обл., 601910 Ковров, ул. Маяковского, 19; e-mail: ssmetanin@bk.ru

оттока энергии во вторую стоксову ВКР-компоненту, препятствующая увеличению энергии первой стоксовой компоненты ВКР-излучения на длине волны 1.53 мкм.

В настоящей работе нами исследованы возможности повышения эффективности однокаскадной ВКР-генерации излучения с длиной волны 1.53 мкм в кристалле ВаWO<sub>4</sub>, установленном во внешнем ВКР-резонаторе, при накачке импульсным наносекундным излучением Nd:YAG-лазера с длиной волны 1.34 мкм.

## 2. Теоретическое описание ВКР в резонаторе

Использование ВКР-резонатора позволяет селективно управлять потерями в процессе генерации различных ВКР-компонент излучения. При этом добротность резонатора повышают для требуемых компонент и понижают для нежелательных компонент, тогда требуемые компоненты генерируются в многопроходном режиме и испытывают большее ВКР-усиление, чем нежелательные.

Хорошо известно условие порога ВКР [1]

$$gI_{th}L_{eff} \approx 25, \tag{1}$$

где  $g$  – коэффициент ВКР-усиления среды;  $I_{th}$  – пороговая интенсивность излучения накачки в ВКР-среде;  $L_{eff}$  – эффективная длина взаимодействия излучения накачки с ВКР-средой. В случае помещения ВКР-среды в ВКР-резонатор эффективная длина взаимодействия может быть определена [8] как

$$L_{eff} = LN_{eff}, \tag{2}$$

где  $L$  – длина ВКР-среды;  $N_{eff}$  – эффективное число проходов ВКР-излучения по ВКР-резонатору.

С другой стороны, учет потерь в ВКР-резонаторе и конечности длительности импульса накачки дает условие порога ВКР в резонаторе:

$$(g_r I_{th} - k_1)z_0 \approx 25, \tag{3}$$

где  $g_r = gL/L_r$  – распределенный по длине резонатора коэффициент ВКР-усиления;  $L_r$  – оптическая длина ВКР-резонатора;  $z_0 = \tau_0 c$ ;  $\tau_0$  – длительность импульса излучения накачки;  $c$  – скорость света;

$$k_1 = \frac{1}{L_r} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1}} \tag{4}$$

– коэффициент распределенных потерь резонатора для ВКР-излучения;  $R_1$  – коэффициент отражения выходного зеркала резонатора для ВКР-излучения (или произведение коэффициентов отражения входного и выходного зеркал, если входное зеркало также частично пропускает ВКР-излучение). При этом из (1)–(4) легко находится выражение для эффективного числа проходов:

$$N_{eff} \approx \left( \frac{L_r}{\tau_0 c} + \frac{1}{25} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1}} \right)^{-1}. \tag{5}$$

Подстановка  $N_{eff}$  (5) в (1), (2) дает пороговую интенсивность  $I_{th}$  накачки. Для эффективного ВКР-преобразования интенсивность излучения накачки внутри ВКР-резонатора должна превышать пороговую.

На рис.1 представлены зависимости эффективного числа проходов  $N_{eff}$  от коэффициента отражения  $R_1$  выходного зеркала ВКР-резонатора для ВКР-излучения, рассчитанные по формуле (5) (сплошные кривые) при

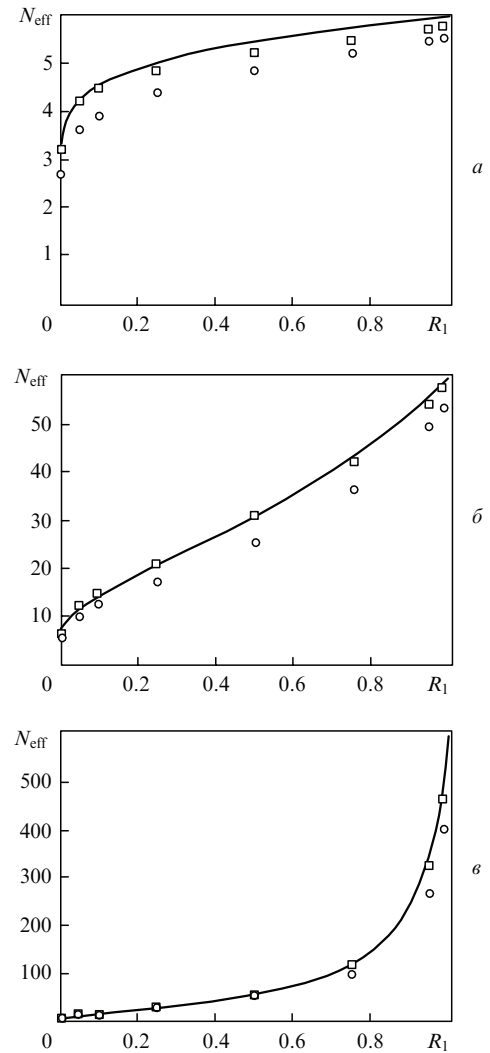


Рис.1. Теоретические (кривые) и расчетные (точки) зависимости эффективного числа проходов  $N_{eff}$  от коэффициента отражения  $R_1$  выходного зеркала ВКР-резонатора для ВКР-излучения при  $\tau_0 c/L_r = 6$  (а), 60 (б) и 600 (в) для входных импульсов гауссовой (○) и прямоугольной (□) формы.

различных относительных длительностях лазерного излучения  $\tau_0 c/L_r$ .

Из рис.1 видно, что при увеличении коэффициента отражения выходного зеркала  $R_1$  эффективное число проходов  $N_{eff}$  увеличивается от значения, близкого к единице, до значения, близкого к  $\tau_0 c/L_r$ . При этом увеличение относительной длительности лазерного излучения  $\tau_0 c/L_r$  приводит к более стремительной зависимости  $N_{eff}$  от  $R_1$ . В связи с этим необходимо отметить, что при более длинном лазерном импульсе селекция нежелательных ВКР-компонент путем введения селективных потерь (например, с помощью дихроичного выходного зеркала) происходит легче, что и требуется для предотвращения генерации второй стоксовой компоненты. Так, при  $R_1 = 80\%$  и  $10\%$  для первой и второй стоксовых компонент в случае  $\tau_0 c/L_r = 60$  эффективное число проходов для второй стоксовой компоненты в три раза меньше, чем для первой, а в случае  $\tau_0 c/L_r = 600$  эффективные числа проходов для данных ВКР-компонент различаются уже на порядок, что позволяет предотвращать генерацию второй стоксовой компоненты введением селективных потерь.

Оценим по формулам (1)–(5) пороговую интенсивность импульсного наносекундного ( $\tau_0 = 50$  нс) лазерного излучения ( $\lambda_0 = 1.34$  мкм) для ВКР-генерации первой стоксовой компоненты ( $\lambda_1 = 1.53$  мкм) в кристалле  $\text{BaWO}_4$  длиной  $L = 4$  см, установленном в ВКР-резонаторе с оптической длиной  $L_r = 14$  см, выходное зеркало которого имеет коэффициент отражения  $R_1 = 50\%$  для первой стоксовой компоненты, что соответствует параметрам экспериментальной системы, описанной в [7]. Расчет по формуле (5) дает эффективное число проходов  $N_{\text{eff}} \approx 40$ . Следовательно, пороговый инкремент ВКР-усиления  $gI_{\text{th}}L = 25/N_{\text{eff}} \approx 0.6$ , а пороговая интенсивность лазерного излучения накачки  $I_{\text{th}} \approx 26$  МВт/см<sup>2</sup>. Однако в соответствующем эксперименте [7] пороговая интенсивность была на порядок больше, что говорит о несправедливости данной приближенной оценки.

Несоответствие теории и эксперимента может быть объяснено тем, что высокая интенсивность накачки в эксперименте [7] достигалась путем острой фокусировки лазерного излучения линзой с фокусным расстоянием 180 мм, что не учтено в теоретической оценке. При этом длина перетяжки пучка накачки была как минимум в два раза меньше длины ВКР-резонатора, что обуславливает существенные дифракционные потери при отражении от плоских зеркал резонатора.

Учет дифракционных потерь излучения можно провести при математическом моделировании процесса ВКР-преобразования, что также позволяет учесть генерацию не только первой, но и второй стоксовой компоненты.

### 3. Математическое моделирование с учетом дифракционных потерь

Построим модель ВКР в кристалле  $\text{BaWO}_4$ , помещенном во внешний резонатор. Пусть резонатор имеет высокую добротность для генерации требуемой первой стоксовой компоненты с  $\lambda_1 = 1.53$  мкм. Пусть также резонатор имеет некоторую добротность и для нежелательной второй стоксовой ВКР-компоненты излучения, условия предотвращения генерации которой необходимо исследовать. Остальные ВКР-компоненты можно не принимать во внимание.

Система скоростных уравнений, описывающих двухкаскадное ВКР-преобразование, записывается следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \left( \pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_0^{(\pm)} &= -g \frac{\lambda_1}{\lambda_0} (I_1^{(+)} + I_1^{(-)}) I_0^{(\pm)} - k_0^{(\pm)} I_0^{(\pm)}, \\ \left( \pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_1^{(\pm)} &= -g \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (I_2^{(+)} + I_2^{(-)}) I_1^{(\pm)} \\ &+ g (I_0^{(+)} + I_0^{(-)}) (I_1^{(\pm)} + \varepsilon I_0^{(\pm)}) - k_1^{(\pm)} I_1^{(\pm)}, \\ \left( \pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) I_2^{(\pm)} &= g (I_1^{(+)} + I_1^{(-)}) (I_2^{(\pm)} + \varepsilon I_1^{(\pm)}) - k_2^{(\pm)} I_2^{(\pm)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n$  – показатель преломления ВКР-среды;  $I_j^{(\pm)}$  – интенсивность волны накачки ( $j = 0$ ), первой стоксовой ( $j = 1$ ) и второй стоксовой ( $j = 2$ ) волн, распространяющихся вперед (+) и назад (–) по ВКР-среде;  $k_j^{(\pm)}$  – коэффициенты вредных потерь;  $\varepsilon$  – затравочный коэффициент.

Граничные условия для системы уравнений (6) имеют вид

$$\begin{aligned} I_0^{(+)}(0, t) &= I_{\text{in}}(t)(1 - R_0^{\text{in}}) + I_0^{(-)}(0, t - t_{\text{in}})R_0^{\text{in}}, \\ I_0^{(-)}(L, t) &= I_0^{(+)}(L, t - t_{\text{out}})R_0^{\text{out}}, \\ I_1^{(+)}(0, t) &= I_1^{(-)}(0, t - t_{\text{in}})R_1^{\text{in}}, \\ I_1^{(-)}(L, t) &= I_1^{(+)}(L, t - t_{\text{out}})R_1^{\text{out}}, \\ I_2^{(+)}(0, t) &= I_2^{(-)}(0, t - t_{\text{in}})R_2^{\text{in}}, \\ I_2^{(-)}(L, t) &= I_2^{(+)}(L, t - t_{\text{out}})R_2^{\text{out}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $R_j^{\text{in}}$  и  $R_j^{\text{out}}$  – коэффициенты отражения входного (in) и выходного (out) зеркал ВКР-резонатора для  $j$ -й ВКР-компоненты;  $t_{\text{in}}$  и  $t_{\text{out}}$  – времена двойного прохода от зеркал резонатора до ближайших торцов ВКР-кристалла;  $I_{\text{in}}(t)$  – интенсивность входного импульса излучения накачки.

Проведем численное решение системы уравнений (6) с граничными условиями (7) при следующих фиксированных входных параметрах [1]:  $\lambda_0 = 1.34$  мкм,  $\lambda_j = (\lambda_0^{-1} - j\nu_R)^{-1}$ ,  $\nu_R = 926$  см<sup>-1</sup>,  $g = 5.8$  см/ГВт,  $L = L_r/n = 5$  см (зеркала на торцах кристалла),  $n = 1.84$ ,  $\varepsilon = 10^{-11}$ ,  $R_0^{\text{in}} = 0$ ,  $R_1^{\text{in}} = R_2^{\text{in}} = 100\%$ ,  $R_2^{\text{out}} = 10\%$ . При этом рассмотрим случаи однопроходной ( $R_0^{\text{out}} = 0$ ) и двухпроходной ( $R_0^{\text{out}} = 100\%$ ) накачки. Во втором случае полное отражение выходным зеркалом излучения накачки приводит к удвоению внутррезонаторной интенсивности  $I_L$  накачки по сравнению с интенсивностью  $I_{\text{in}}$  на входе в ВКР-резонатор.

На рис.1 вместе с теоретическими зависимостями представлены результаты численного моделирования при  $k_j^{(\pm)} = 0$  для входных импульсов разной формы. Видно, что в случае прямоугольного импульса результаты численного эксперимента хорошо соответствуют теоретической зависимости с погрешностью менее 10%. При гауссовом входном импульсе данная погрешность не превышает 20%, т. е. оценки по формуле (5) можно считать удовлетворительными даже в случае гауссова лазерного импульса, получаемого обычно в эксперименте.

Учет фокусировки излучения накачки может быть проведен в рамках системы уравнений (6) через коэффициенты вредных потерь  $k_0^{(\pm)}$ . Изменение радиуса лазерного пучка внутри резонатора при фокусировке лазерного излучения на входное зеркало ВКР-резонатора (соответствует эксперименту [7]) можно определить как [10]

$$r^2(z) = r_0^2 \left( 1 + \frac{z^2}{z_w^2} \right), \quad (8)$$

где  $z$  – продольная координата, отсчитываемая от входа в ВКР-резонатор;  $z_w$  – длина перетяжки лазерного пучка. В этом случае коэффициент дифракционного уменьшения интенсивности пучка накачки, распространяющегося вдоль оси  $z$ , определяется как

$$k_0^{(+)} = \frac{2z}{z_w^2 + z^2}. \quad (9)$$

Мы имеем ВКР-резонатор, в котором лазерное излучение распространяется не только вперед (с потерями  $k_0^{(+)}$ ),

но и назад (с потерями  $k_0^{(-)}$ ), отражаясь от выходного зеркала. При отражении лазерного пучка назад плоским зеркалом получим

$$k_0^{(-)} = \frac{2(2L - z)}{z_w^2 + (2L - z)^2}. \quad (10)$$

На рис.2 приведены расчетные зависимости пороговых инкрементов  $(gI_{in}L)_{th1, th2}$  генерации первой и второй стоксовых ВКР-компонент излучения от отношения длины перетяжки пучка накачки к длине ВКР-резонатора  $z_w/L_r$  в случаях однопроходной ( $R_0^{out} = 0$ ) и двухпроходной ( $R_0^{out} = 100\%$ ) накачки при  $R_1^{out} = 50\%$  (соответствует эксперименту [7]) для гауссова импульса накачки с пиковой интенсивностью  $I_{in}$  и относительной длительностью  $\tau_0 c/L_r = 60$ .

Из рис.2 видно, что уменьшение относительной длины перетяжки пучка  $z_w/L_r$  приводит, во-первых, к увеличению пороговых инкрементов, особенно быстрому при  $z_w/L_r < 1$ , а во-вторых, к сближению пороговых инкрементов для первой и второй стоксовых компонент (сближение кривых 1 и 2, а также 3 и 4). Так, при  $z_w/L_r = 3$  в случае однопроходной накачки пороговые инкременты составляют 1.03 для первой стоксовой компоненты и 1.48 для второй, а в случае двухпроходной накачки – 0.52 и 1.07 соответственно. Уменьшение относительной длины перетяжки пучка  $z_w/L_r$  ( $z_w/L_r < 0.5$ ) приводит к многократному увеличению пороговых инкрементов  $(gI_{in}L)_{th1, th2}$ , но при этом они различаются менее чем в 1.3 раза в случаях однопроходной и двухпроходной накачки. Это объясняет наблюдаемый в эксперименте [7] завышенный (относительно теоретической оценки) порог генерации первой стоксовой компоненты и заниженный (относительно этого порога) порог генерации второй стоксовой компоненты (экспериментально измеренные пороговые энергии равны соответственно 14 и 18 мДж и различаются также в 1.3 раза) при острой фокусировке излучения накачки ( $z_w/L_r < 0.5$ ). Отметим, что результаты моделирования с учетом паразитных потерь первой и второй стоксовых компонент ( $k_{1,2}^{(\pm)} > 0$ ) качественно не изменили представленную картину.

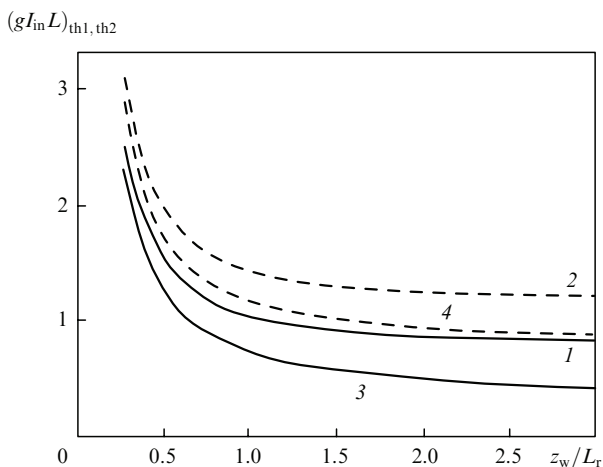


Рис.2. Расчетные зависимости пороговых инкрементов  $(gI_{in}L)_{th1, th2}$  (сплошные кривые) и  $(gI_{in}L)_{th2}$  (штриховые кривые) ВКР-генерации первой (1, 3) и второй (2, 4) стоксовых ВКР-компонент излучения от относительной длины перетяжки лазерного пучка накачки  $z_w/L_r$  в случаях однопроходной (1, 2) и двухпроходной (3, 4) накачки при  $R_1^{out} = 50\%$  и  $\tau_0 c/L_r = 60$ .

Таким образом, наилучшие условия для предотвращения генерации второй стоксовой компоненты наблюдаются при  $z_w/L_r \geq 3$ , т.е. нужно отказаться от острой фокусировки лазерного излучения накачки, а инкремент ВКР-усиления увеличивать путем использования более мощного лазера накачки или ВКР-среды большей длины. Необходимо отметить дополнительные преимущества двухпроходной накачки по сравнению с однопроходной, также демонстрируемые на рис.2. К известному факту – снижению порога генерации первой стоксовой компоненты – добавляется тот факт, что при  $z_w/L_r \geq 3$  порог генерации второй стоксовой компоненты оказывается выше порога первой в 2.06 раза в отличие от случая однопроходной накачки, где он лишь в 1.43 раза выше (заметим, что мы принимали  $R_1^{out} = 50\%$ ,  $R_2^{out} = 10\%$ ).

#### 4. Экспериментальные исследования однокаскадной ВКР-генерации излучения с длиной волны 1.53 мкм

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.3. Для увеличения энергии лазерной генерации в резонаторе лазера накачки использовались два активных YAG:Nd-элемента 1 и 2 размером  $\varnothing 6.3 \times 130$  мм, помещенные в одноламповые квантроны с диффузионными отражателями и импульсной ламповой накачкой длительностью 250 мкс с частотой повторения 5 Гц. Селективный Z-образный резонатор Nd:YAG-лазера накачки был образован глухими зеркалами 3, 4 и 5 (коэффициент отражения на  $\lambda_0 = 1.34$  мкм  $R_{1.34} = 99\%$ , коэффициент отражения на длине волны 1.064 мкм  $R_{1.064} < 1\%$ ) и пропускающим выходным зеркалом 6 ( $R_{1.34} = 40\%$ ,  $R_{1.064} < 1\%$ ). Несмотря на нежелательное увеличение длины резонатора, данная схема обеспечила эффективное подавление излучения на длине волны 1.064 мкм. В качестве модулятора добротности 7 применялся электрооптический затвор на кристалле LiNbO<sub>3</sub> или пассивный затвор на кристалле YAG:V с начальным пропусканием 50% на  $\lambda_0 = 1.34$  мкм. С целью улучшения модового состава излучения и предотвращения повреждения торцов оптических элементов устанавливалась диафрагма 8 диаметром 5 мм.

Для обеспечения возможности ВКР-генерации без фокусировки излучения накачки использовался ВКР-кристалл BaWO<sub>4</sub> длиной  $L = 8$  см (в два раза больше, чем в работе [7]). ВКР-кристалл 9 помещался во внешний ВКР-резонатор (геометрическая длина резонатора 16 см), образованный вогнутым входным зеркалом 10 (радиус кривизны 500 мм,  $R_{1.34} = 20\%$ ,  $R_{1.53} = 80\%$ ) и плоским выходным зеркалом 11 ( $R_{1.34} = 99\%$ ,  $R_{1.53} = 60\%$ ). Заметим, что произведение коэффициентов отражения зеркал

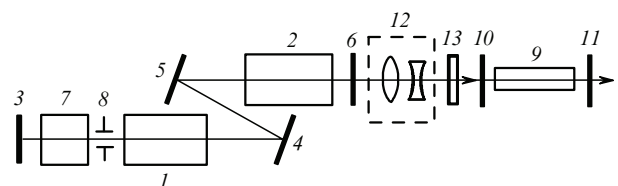


Рис.3. Оптическая схема экспериментальной установки: 1, 2 – активные YAG:Nd-элементы; 3–5 – глухие зеркала; 6 – выходное зеркало лазера накачки; 7 – лазерный затвор; 8 – апертурная диафрагма; 9 – ВКР-кристалл BaWO<sub>4</sub>; 10, 11 – зеркала ВКР-резонатора; 12 – четырехкратный телескоп; 13 – калиброванный фильтр.



ВКР-резонатора для  $\lambda_1 = 1.53$  мкм составляет  $\sim 50\%$ , как и в работе [7], но при этом зеркало 11 обеспечивает двухпроходную накачку, приводящую к повышению эффективности генерации первой стоксовой компоненты и ослаблению генерации второй стоксовой компоненты.

Увеличение интенсивности лазерного излучения в ВКР-резонаторе достигалось не с помощью фокусировки лазерного излучения, как в работе [7], а путем применения четырехкратного телескопа 12, уменьшающего диаметр лазерного пучка в ВКР-резонаторе с 5.2 до 1.3 мм. Для изменения вкачиваемой в ВКР-резонатор энергии лазерного излучения в качестве фильтра 13 использовались калиброванные частично пропускающие зеркала.

Экспериментальные исследования энергетических лазерных характеристик проводились с помощью измерителя мощности и энергии Ophir. Временные параметры измерялись лавинным фотодиодом ЛФД-2А, подключенным к осциллографу Agilent (300 МГц). Разделение ВКР-компонент излучения осуществлялось дисперсионными призмами.

Сначала исследования выполнялись с использованием электрооптического затвора в лазере накачки. При этом Nd:YAG-лазер накачки генерировал моноимпульс излучения на  $\lambda_0 = 1.34$  мкм длительностью 40 нс. На рис.4 представлены экспериментальные зависимости энергии импульса  $W_S$ , а также энергетической эффективности  $\eta$  ВКР-преобразования для первой и второй стоксовых ВКР-компонент излучения от энергии импульса излучения накачки  $W_L$ . Данные рис.4 соответствуют суммарному ВКР-излучению, выходящему из ВКР-резонатора не только вперед через зеркало 11 (рис.3), но и назад через зеркало 10 (параметры обратного ВКР-излучения измерялись при отражении от фильтрующего зеркала 13).

Из рис.4 видно, что при увеличении энергии  $W_L$  энергия импульса  $W_S$  первой стоксовой ВКР-компоненты сначала растет линейно и эффективность  $\eta$  ВКР-преобразования при трехкратном превышении порога ВКР-генерации достигает высокого значения – более 50%. По сравнению с результатами работы [7] здесь начальная скорость роста энергии первой стоксовой компоненты на порядок больше благодаря отсутствию низкого порога генерации второй стоксовой компоненты, и только при энергии накачки  $W_L > 21$  мДж наблюдается насыщение роста энергии на  $\lambda_1 = 1.53$  мкм из-за преодоления порога генерации второй стоксовой компоненты и оттока в нее части энергии. При максимальной энергии лазерного импульса накачки 31 мДж (ограниченной повреждением торцов ВКР-кристалла) энергии импульсов первой и второй стоксовых компонент достигают 16.7 и 3.3 мДж соответственно. Энергетическая эффективность генерации первой стоксовой компоненты имеет максимум  $\eta \approx 60\%$  при  $W_L = 23$  мДж, а эффективность генерации второй стоксовой компоненты имеет наибольшее значение  $\eta \approx 10\%$  при максимальной энергии накачки. Дифференциальный КПД суммарной генерации первой и второй стоксовых ВКР-компонент составил  $\sim 80\%$ , что близко к квантовому пределу  $(\lambda_0/\lambda_1)100\% = 87.6\%$ . При этом длительность импульсов ВКР-излучения была равна 30 нс.

Из рис.4 также видно, что пороговая энергия генерации первой стоксовой ВКР-компоненты – около 6 мДж – оказалась примерно в два раза меньше, чем в работе [7], хотя нами не использовалась острая фокусировка излучения накачки. При этом экспериментально измеренная

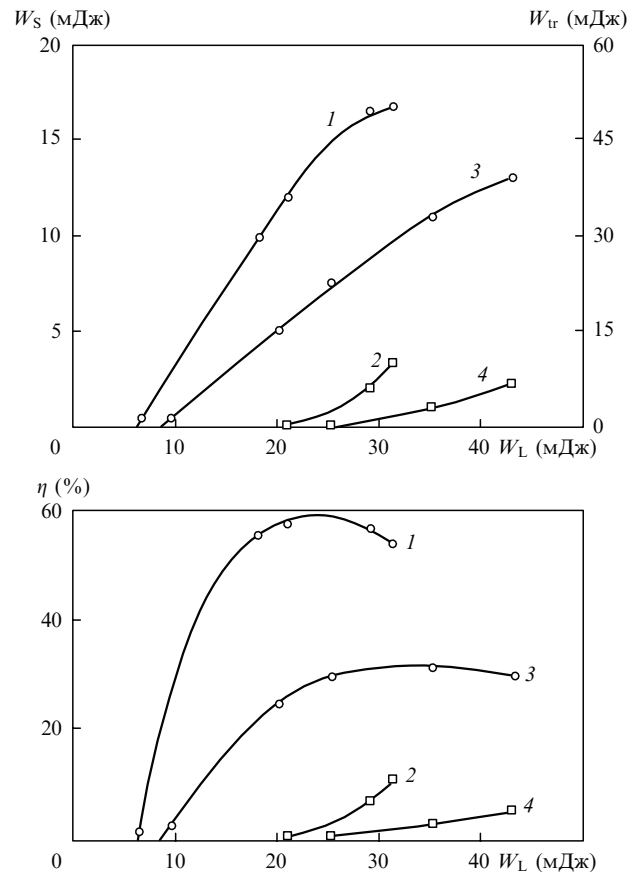


Рис.4. Экспериментальные зависимости энергии импульса  $W_S$  (1, 2) и дуга импульсов  $W_{tr}$  (3, 4) (а), а также энергетической эффективности  $\eta$  (б) ВКР-преобразования для первой (1, 3) и второй (2, 4) стоксовых ВКР-компонент излучения от энергии импульса  $W_L$  излучения накачки, полученные при использовании электрооптического (1, 2) и пассивного (3, 4) затворов.

пороговая интенсивность входного импульсного излучения накачки  $I_{in}$  (длительность импульса 40 нс, диаметр пучка 1.3 мм) составила  $11.3 \text{ МВт/см}^2$ , а экспериментальный пороговый инкремент ВКР-усиления  $(gI_{in}L)_{th1} = 0.524$ , что хорошо согласуется с результатом математического моделирования (0.52) в случае двухпроходной накачки при  $z_w/L_R \geq 3$  (см. рис.2, кривая 3). Также наблюдается удовлетворительное согласие с теоретической оценкой порога ВКР по формулам (1)–(5), в которых  $I_{th} \approx 2I_{in}$  (двухпроходная накачка): эффективное число проходов  $N_{eff} \approx 29$  и пороговый инкремент ВКР-усиления  $(gI_{in}L)_{th1} \approx 25/(2N_{eff}) = 0.43$  (погрешность менее 20%).

Необходимо отметить достигнутое в эксперименте большое различие порогов генерации первой и второй стоксовых компонент (в 3.5 раза), что позволило повысить эффективность однокаскадной внутррезонаторной ВКР-генерации на  $\lambda_1 = 1.53$  мкм вплоть до квантового предела при энергии ВКР-излучения до 20 мДж. Данное различие оказалось даже выше прогнозируемого при математическом моделировании (в два раза, см. рис.2, кривые 3 и 4 при  $z_w/L_R \geq 3$ ), что мы объясняем большей спектральной селекцией излучения с  $\lambda_2 = 1.78$  мкм зеркалами ВКР-резонатора, каждое из которых отражало не более 20% на этой длине волны.

Для обеспечения возможности увеличения вложенной энергии накачки проводились также исследования с пас-

сивным затвором в лазере накачки. При этом Nd:YAG-лазер накачки генерировал пуги из трех лазерных импульсов с длительностью отдельного импульса 60 нс. Благодаря увеличению в 1.5 раза длительности лазерных импульсов (ранее была 40 нс) наибольшая энергия отдельного импульса накачки, ограниченная повреждением торцов ВКР-кристалла, пропорционально увеличилась от 31 мДж (предыдущий эксперимент) до 43 мДж, что позволило вкачивать в ВКР-резонатор пуги из трех лазерных импульсов с энергией пугов до 130 мДж. Изменение энергии лазерного излучения, вводимого в ВКР-резонатор, также проводилось с помощью сменных калиброванных фильтров 13 (рис.3).

Результаты данного эксперимента также представлены на рис.4. Из рис.4,а видно, что крутизна роста энергетических зависимостей (кривые 3 и 4) уменьшилась по сравнению со случаем использования электрооптического затвора (кривые 1 и 2) в 1.8 раза, но качественно зависимости схожи. При наибольшей энергии импульса накачки  $W_L = 43$  мДж энергия импульса первой стоксовой компоненты с  $\lambda_1 = 1.53$  мкм достигала 13 мДж, а энергия импульса второй стоксовой компоненты с  $\lambda_2 = 1.78$  мкм – 2.2 мДж. При этом из рис.4,б видно, что максимальная эффективность ВКР-преобразования в первую стоксову компоненту составила 31 %, а во вторую – 5 %. Дифференциальный КПД суммарной ВКР-генерации был равен 44 %. Уменьшение эффективности ВКР-генерации можно объяснить тем, что, во-первых, лазерные импульсы в пуге имели большой разброс интенсивностей (характерный для пассивной модуляции добротности), а во-вторых, эффективности их ВКР-преобразования также имели разброс, что вместе приводило к ухудшению характеристик суммарного ВКР-преобразования пугов импульсов. Однако благодаря большой энергии накачки (130 мДж) в данном эксперименте были получены наибольшие абсолютные значения энергии ВКР-излучения в пуге из трех импульсов на  $\lambda_1 = 1.53$  мкм ( $W_{tr} = 40$  мДж) и на  $\lambda_2 = 1.78$  мкм ( $W_{tr} = 6.6$  мДж).

## 5. Заключение

Таким образом, проведены исследования возможности повышения эффективности однокаскадной ВКР-генерации излучения с длиной волны 1.53 мкм в кристалле

BaWO<sub>4</sub>, установленном во внешнем ВКР-резонаторе, при накачке импульсным наносекундным излучением Nd:YAG-лазера с длиной волны 1.34 мкм.

С помощью теоретических оценок и математического моделирования проанализированы условия генерации первой и второй стоксовых компонент ВКР-излучения в ВКР-резонаторе. Найдены условия предотвращения оттока энергии во вторую стоксову ВКР-компоненту с длиной волны 1.78 мкм для увеличения эффективности однокаскадной внутррезонаторной ВКР-генерации на длине волны 1.53 мкм.

В эксперименте достигнуто различие порогов генерации первой и второй стоксовых ВКР-компонент в 3.5 раза, что позволило повысить эффективность однокаскадной внутррезонаторной ВКР-генерации на длине волны 1.53 мкм вплоть до 60 %, а дифференциальный КПД ВКР-генерации – вплоть до квантового предела (~80 % при энергии импульсов ВКР-излучения до 20 мДж). Применение лазерной накачки пугами импульсов привело к увеличению энергии ВКР-излучения на длине волны 1.53 мкм до 40 мДж в пуге из трех импульсов.

Дальнейшие исследования будут посвящены повышению средней мощности ВКР-излучения на длине волны 1.53 мкм при увеличении частоты повторения импульсов излучения, что может быть реализовано благодаря наилучшим среди ВКР-кристаллов термооптическим свойствам BaWO<sub>4</sub>.

1. Basiev T.T., Powell R.C., in *Handbook of Laser Technology and Applications* (Bristol–Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2004).
2. Murray J.T., Powel R.C., Peyghambarian N., Smith D., Austin W., Stolzenberger R.A. *Opt. Lett.*, **20**, 1017 (1995).
3. Басиев Т.Т. *ФТТ*, **47** (8), 1354 (2005).
4. Басиев Т.Т., Осико В.В. *Успехи химии*, **75**, 939 (2006).
5. Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. *Laser Phys.*, **13**, 1013 (2003).
6. Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **34** (7), 649 (2004).
7. Грэхэм К., Федоров В.В., Мирон С.Б., Дорошенко М.Е., Басиев Т.Т., Орловский Ю.В., Осико В.В., Бадиков В.В., Панютин В.Л. *Квантовая электроника*, **34** (1), 8 (2004).
8. Zverev P.G., Basiev T.T., Prokhorov A.M. *Opt. Mater.*, **11**, 335 (1999).
9. Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
10. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 1990).