

# ВКР-преобразование излучения с высокой средней мощностью в кристалле $BaWO_4$

Т.Т.Басиев, А.В.Гаврилов, В.В.Осико, С.Н.Сметанин, А.В.Федин

С помощью кристалла  $BaWO_4$  исследовано ВКР-преобразование повторяющихся с высокой частотой цугов гигантских импульсов излучения YAG: Nd-лазера с самообращением волнового фронта. Показана возможность получения ВКР-излучения со средней мощностью до 7.5 Вт и энергией отдельного импульса в цуге 30 мДж при эффективности ВКР-преобразования 20 % – 30 %. Измеренная оптическая сила термлинзы кристалла  $BaWO_4$  при лазерной накачке со средней мощностью 30 Вт составила  $0.12 \text{ м}^{-1}$ , что на порядок меньше, чем в известном ВКР-кристалле  $Ba(NO_3)_2$ .

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, эффективность преобразования, стокового компонента излучения, термлинза.

Создание мощных твердотельных лазеров в различных спектральных диапазонах является актуальной задачей лазерной физики. Один из путей ее решения заключается в использовании ВКР-преобразования излучения лазеров ближнего ИК диапазона. Среди известных, достаточно хорошо изученных ВКР-активных сред наиболее эффективными [1 – 10] считаются кристаллы нитрата бария  $Ba(NO_3)_2$  и калий-гадолиниевого вольфрамата  $KGd(WO_4)_2$ . Это обусловлено значительным коэффициентом ВКР-усиления  $g$ , достигающим при длине волны накачки 1.06 мкм значения 6 см/ГВт в кристалле  $KGd(WO_4)_2$  и 11 см/ГВт в кристалле  $Ba(NO_3)_2$ .

В работе [11] с помощью кристалла  $Ba(NO_3)_2$  нами исследовано ВКР-преобразование цугов импульсов одномодового одночастотного излучения YAG: Nd-лазера с самообращением волнового фронта (самоОВФ) и показана возможность получения первой стоковой компоненты ВКР-излучения со средней мощностью до 5 Вт и энергией отдельного импульса  $\sim 30$  мДж при эффективности ВКР-преобразования 15 % – 30 %.

Однако кристаллы  $Ba(NO_3)_2$  гигроскопичны и имеют низкие механические и теплофизические характеристики [7]. Так, оптическая сила термлинзы в них достигает  $8 \text{ м}^{-1}$  [9] при плотности средней мощности накачки  $0.7 \text{ кВт} \times \text{см}^{-2}$ . Хотя кристаллы  $KGd(WO_4)_2$  лишены указанных выше недостатков, они имеют низкую оптическую стойкость и малое пиковое сечение ВКР-переходов [7]. Указанные ограничения являются серьезным препятствием для создания мощных твердотельных ВКР-лазеров. В

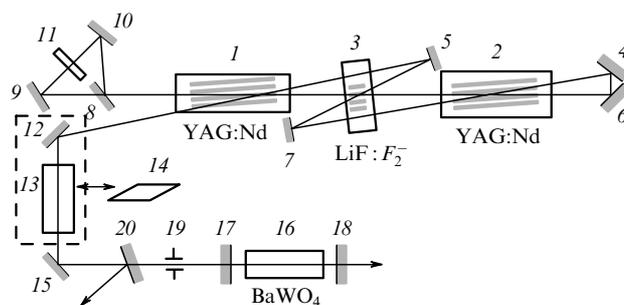


Рис.1. Оптическая схема лазера:

1, 2 – активные элементы из YAG: Nd; 3 – пассивный лазерный затвор на кристалле  $LiF: F_2^-$ ; 4–7, 12, 15 – поворотные зеркала; 8–10 – концевой отражатель на базе интерферометра Саньяка; 11 – фазовая пластинка  $\lambda/2$ ; 13 – вращатель Фарадея; 14 – ромб Френеля; 16 – ВКР-среда на кристалле  $BaWO_4$ ; 17, 18 – входное и выходное зеркала ВКР-резонатора; 19 – диафрагма; 20 – зеркало-ослабитель.

связи с этим становится актуальным поиск новых ВКР-активных сред, обладающих высокими механическими и теплофизическими параметрами и лучевой стойкостью, которые не уступают кристаллу  $Ba(NO_3)_2$  по ВКР-усилению и позволяют получить более высокие энергетические характеристики ВКР-излучения. Исследования последних лет привели к созданию новых высокоэффективных кристаллов [8], одним из которых является кристалл вольфрамата бария  $BaWO_4$  ( $g \geq 8.5 \text{ см/ГВт}$ ) [9]. Даже при большей ширине линии комбинационно-рассеянного перехода ( $\Delta\nu_{BaWO_4} = 1.63 \text{ см}^{-1}$ ,  $\Delta\nu_{Ba(NO_3)_2} = 0.4 \text{ см}^{-1}$ ) кристалл  $BaWO_4$  почти не уступает кристаллу  $Ba(NO_3)_2$  по пиковому значению сечения перехода [7–9], что обеспечивается значительно более высоким интегральным сечением рассеяния.

В настоящей работе исследована возможность получения ВКР-излучения с высокой средней мощностью с помощью перспективного кристалла  $BaWO_4$  при накачке таким же YAG: Nd-лазером, что и в [11].

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Лазер накачки состоит из двух YAG: Nd-активных элементов (АЭ) 1 и 2 размером  $\varnothing 6.3$

Т.Т.Басиев, В.В.Осико. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 117999 Москва, ул. Вавилова, 38;

тел.: (095) 135 02 67, e-mail: basiev@lst.gpi.ru

А.В.Гаврилов, С.Н.Сметанин, А.В.Федин. Ковровская государственная технологическая академия, Россия, 601910 Ковров, Владимирская обл., ул. Маяковского, 19;

тел.: (09232) 3 13 47; e-mail: kanir@kc.ru

Поступила в редакцию 26 января 2004 г., после доработки – 13 мая 2004 г.

× 100 мм, установленных в одноламповые квантроны, пассивного лазерного затвора 3 на кристалле  $\text{LiF:F}_2^-$ , четырех поворотных зеркал (4–7) и концевого отражателя на базе интерферометра Саньяка, образованного светоделительным зеркалом 8 и зеркалами 9 и 10. Для выделения линейной поляризации излучения в интерферометре Саньяка установлена фазовая ( $\lambda/2$ ) пластинка 11. В процессе развития генерации в АЭ и кристалле  $\text{LiF:F}_2^-$  внутрирезонаторные пересекающиеся пучки записывают динамические голографические решетки, образующие самоподстраивающийся ОВФ-резонатор лазера [11]. Это обеспечивает получение одномодового (параметр качества  $M^2 < 1.2$ ) линейно поляризованного одночастотного излучения со средней мощностью до 35 Вт в виде пугов переменного числа импульсов (2–10) с длительностью 20–100 нс и энергией до 360 мДж при частоте следования пугов до 30 Гц.

В качестве ВКР-среды 16 мы использовали кристалл  $\text{BaWO}_4$  размером  $6 \times 8 \times 95$  мм, выращенный методом Чохральского в Отделении лазерных технологий Научного центра лазерных материалов и технологий ИОФ РАН [9]. Кристалл  $\text{BaWO}_4$  устанавливался во внешний резонатор, образованный входным ( $R_{1,064} = 15\%$ ,  $R_{1,18-1.40} = 100\%$ ) и выходным ( $R_{1,064} = 77\%$ ,  $R_{1,18-1.40} = 45\%$ ) плоскими дихроичными зеркалами. Для устранения отрицательного влияния излучения, отраженного от ВКР-резонатора, на развитие генерации в лазере накачки применялся невзаимный элемент. При частоте пугов импульсов накачки до 10 Гц использовались поляризационное зеркало 12 и вращатель Фарадея 13, а при частоте более 10 Гц вращатель Фарадея заменялся ромбом Френеля 14, выполнявшим функции пластинки  $\lambda/4$ .

Высокие спектральные, пространственные и энергетические параметры излучения  $\text{YAG:Nd}$ -лазера позволяли использовать его для ВКР-преобразования без дополнительной фокусировки в нелинейный кристалл. Для согласования апертуры  $\text{YAG:Nd}$ -лазера (4.2 мм) и ВКР-резонатора (3.2 мм) диаметр пучка накачки ограничивали диафрагмой 19 диаметром 3.2 мм (см. рис.1).

Измерения энергетических параметров осуществлялись с помощью измерителя мощности ИМО-2Н. Временные характеристики излучения регистрировались на осциллографе Agilent 54641A с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2А. При этом энергетические и временные параметры излучения накачки измерялись перед входным зеркалом ВКР-резонатора. Энергия импульсов накачки, посылаемая в ВКР-резонатор, изменялась сменными оптическими фильтрами 20. Для регистрации ВКР-излучения использовались спектральные призмы, которые раскладывали выходное излучение на спектральные составляющие – излучение накачки ( $\lambda_0 = 1.064$  мкм), первую ( $\lambda_1 = 1.18$  мкм), вторую ( $\lambda_2 = 1.325$  мкм) и третью ( $\lambda_3 = 1.51$  мкм) стоксовы компоненты.

Исследование ВКР-преобразования проводилось путем постепенного увеличения числа импульсов в пуге, их энергии и частоты следования пугов, что обеспечивало рост средней мощности излучения накачки. Первоначально мы исследовали преобразование пугов, состоящих из двух лазерных импульсов накачки, которые следовали с частотой 10 Гц. Для этого пропускание кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$  устанавливалось равным 30%; оптическая накачка активных элементов составляла 40 Дж на каждый квантрон. При этом энергия отдельных импульсов излучения достигала 60 мДж, а их длительность – 20 нс.

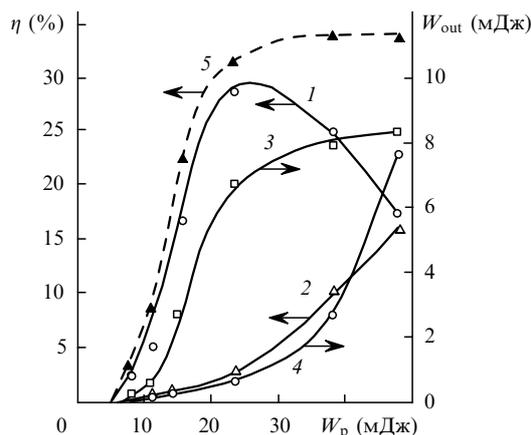


Рис.2. Зависимости эффективности  $\eta$  ВКР-преобразования и энергии  $W_{out}$  отдельного импульса первой (1, 3) и второй (2, 4) стоксовых компонент, а также суммарного (5) выходного ВКР-излучения от энергии  $W_p$  отдельного импульса излучения накачки при накачке пугами, состоящими из двух импульсов излучения.

На рис.2 показаны результаты эксперимента, из которых следует, что с ростом энергии импульсов накачки до 50 мДж энергия ВКР-компонент плавно увеличивается до 8 мДж, в то время как эффективность преобразования в первую стоксовую компоненту имеет максимум, составляющий 30%, при энергии импульсов накачки 25 мДж.

Уменьшение эффективности преобразования при более высокой энергии накачки объясняется заметным ростом второй стоксовой ВКР-компоненты (пороги возникновения первой и второй стоксовых компонент близки вследствие использования неселективного высокодобротного ВКР-резонатора), которая при энергии накачки 50 мДж достигает энергии, соизмеримой с энергией первой стоксовой ВКР-компоненты, также равной  $\sim 8$  мДж. Эффективность преобразования в каждую из стоксовых компонент в данном случае составляет около 17%. При этом максимальная суммарная эффективность ВКР-преобразования равна 34% (штриховая кривая на рис.2), что соответствует квантовой эффективности 39%.

Для исследований ВКР-преобразования при более высокой средней мощности лазерной накачки, большем числе импульсов в пуге и более высокой частоте их повторения мы увеличили начальное пропускание кристалла  $\text{LiF:F}_2^-$  до  $\sim 50\%$  и энергию накачки активных элементов до  $\sim 60$  Дж. В этом случае число импульсов в пуге возросло до восьми, энергия отдельного импульса увеличилась до 145 мДж, а длительность импульсов – до 50 нс. Частота следования пугов импульсов была увеличена до 30 Гц. При этом средняя мощность лазерного излучения накачки составила 35 Вт.

На рис.3 приведены зависимости средней мощности и энергии отдельного импульса излучения компонент ВКР-излучения от средней мощности излучения накачки. Наблюдается возникновение трех ВКР-компонент со средней мощностью до 5 Вт в первой стоксовой компоненте, 2.4 Вт – во второй и 0.25 Вт – в третьей при энергии отдельного импульса компонент ВКР-излучения 20, 10 и 1 мДж соответственно. Для данного режима накачки максимальная эффективность ВКР-преобразования в первую стоксовую компоненту составила 18.4%, во вторую – 8.8% и в третью – 1%. При этом средняя мощность суммарного ВКР-излучения превысила 7.5 Вт. Следовательно, при большой средней мощности максимальная

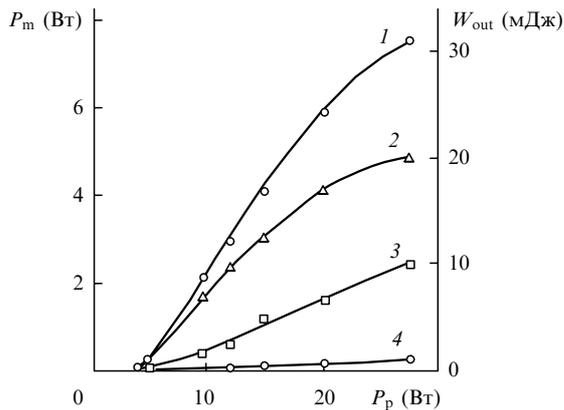


Рис.3. Зависимости средней мощности  $P_m$  и энергии  $W_{out}$  отдельного импульса суммарного ВКР-излучения (1), а также первой (2), второй (3) и третьей (4) стоксовых компонент выходного излучения от средней мощности излучения накачки  $P_p$  при накачке пугами, состоящими из восьми импульсов излучения

суммарная эффективность ВКР-преобразования достигла 28.2 %, а квантовая эффективность составила 31.5 %.

Необходимо отметить, что при продолжительном воздействии накачки с плотностью мощности до 40 кВт  $\times$  см<sup>-2</sup> в кристалле BaWO<sub>4</sub> не были обнаружены оптические повреждения. Это значение оказалось соизмеримым с допустимой плотностью мощности (38 кВт/см<sup>2</sup>), полученной нами в [11] для кристалла Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. При этом выходное ВКР-излучение, полученное с помощью кристалла BaWO<sub>4</sub>, имело существенно меньшую расходимость, чем при использовании кристалла Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Мы попытались оценить термооптику кристалла BaWO<sub>4</sub> по изменению показателя преломления и оптической силе термолинзы, наведенной в нем под действием излучения накачки со средней мощностью до 30 Вт при диаметре пучка 3.2 мм. Изменение показателя преломления  $\Delta n$  определялось по числу  $N$  смещений полос интерференционной картины, которая создавалась излучением вспомогательного He-Ne-лазера, отраженным от переднего и заднего торцов ВКР-кристалла:  $\Delta n = 0.5N\lambda/L$ , где  $L$  – длина ВКР-кристалла,  $\lambda$  – длина волны вспомогательного лазерного излучения. В предположении квадратичного изменения показателя преломления по поперечному сечению ВКР-кристалла (от  $n + \Delta n$  в его осевой части до  $n$  в его краевой части;  $n = 1.84$  – показатель преломления BaWO<sub>4</sub>) оптическая сила наведенной термолинзы оценивалась сверху [12] как  $1/f = 8\Delta nL/a^2$ , где  $a = 6$  мм – минимальный поперечный размер ВКР-кристалла.

Зависимость оптической силы термолинзы кристалла BaWO<sub>4</sub> от плотности средней мощности излучения накачки представлена на рис.4, откуда следует, что при увеличении средней мощности излучения накачки до 30 Вт в пучке диаметром 3.2 мм оптическая сила термолинзы  $1/f$  линейно возрастает до 0.12 м<sup>-1</sup> (фокусное расстояние термолинзы  $f \geq 7$  м) при скорости ее роста 0.012 м<sup>-1</sup> на 1 Вт/см<sup>2</sup> плотности средней мощности, что на порядок ниже, чем в кристалле нитрата бария [10].

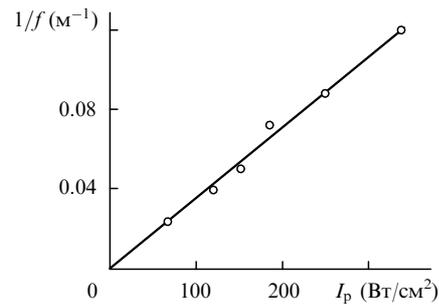


Рис.4. Зависимость оптической силы  $1/f$  термолинзы кристалла BaWO<sub>4</sub> от плотности средней мощности  $I_p$  излучения накачки.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что кристалл BaWO<sub>4</sub> как ВКР-преобразователь обладает рядом преимуществ по сравнению с одним из лучших ВКР-преобразователей, к которым относят кристалл Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Кроме высокой оптической стойкости он имеет почти в два раза большие дифференциальный КПД, а также энергетическую и квантовую эффективность преобразования в суммарное ВКР-излучение при накачке с большой средней мощностью [11]. Лучшие термооптические характеристики кристалла вольфрамата бария, в отличие от кристалла нитрата бария, позволяют повышать среднюю мощность лазерной накачки путем увеличения числа импульсов в пуге или частоты повторения пугов излучения накачки ориентировочно в восемь раз до достижения допустимого фокусного расстояния термолинзы (не менее 1 м). Это свидетельствует о том, что кристалл BaWO<sub>4</sub> является перспективной нелинейной средой для создания ВКР-лазеров с высокой средней мощностью излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ISTC-EOARD (№ 2022 P), Sfr 974143, МК 1594.2003-02, ГС 1К/03 и Федеральной целевой программы «Интеграция» (контракт № И0836).

1. Андриянас К., Вишкакас Ю., Кабелка В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **42**, 333 (1985).
2. Беренберг В.А., Карпухин С.Н., Мочалов И.В. *Квантовая электроника*, **14**, 1849 (1987).
3. Mochalov I.V. *Opt. Eng.*, **36**, 1160 (1997).
4. Basiev T.T., Powell R.C. *Opt. Mater.*, **11**, 301 (1999).
5. Zverev P.G., Basiev T.T., Osiko V.V., et al. *Opt. Mater.*, **11**, 315 (1999).
6. Zverev P.G., Basiev T.T., Prokhorov A.M. *Opt. Mater.*, **11**, 335 (1999).
7. Басиев Т.Т. *УФН*, **169**, 1149 (1999).
8. Basiev T.T., Osiko V.V., Prokhorov A.M., Dianov E.M. *Topics Appl. Phys.*, **89**, 351 (2003).
9. Зверев П.Г., Басиев Т.Т., Соболев А.А. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 55 (2000).
10. Park H.M., Blows J.L., Piper J.A., et al. *Tech. Dig. Advanced Solid-State Lasers* (Seattle, Washington, 2001, p.276).
11. Basiev T.T., Fedin A.V., Gavrilov A.V., et al. *Laser Phys.*, **13**, 1013 (2003).
12. Мезенов А.В., Сомс Л.Н., Степанов А.И. *Термооптика твердотельных лазеров* (Л.: Машиностроение, 1986).