

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬНАЙ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ № 3 2016  
СЕРЫЯ ФІЗІКА-МАТЭМАТЫЧНЫХ НАВУК

УДК 535.375.5:621.375.8

А. А. РУСАК<sup>1</sup>, В. И. ДАШКЕВИЧ<sup>1</sup>, В. А. ОРЛОВИЧ<sup>1</sup>, А. П. ШКАДАРЕВИЧ<sup>2</sup>

**ПОВЫШЕНИЕ ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИИ ВКР-ЛАЗЕРА  
ПУТЕМ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЩЕННОЙ НАКАЧКИ**

<sup>1</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: [bui.anastasiya@gmail.com](mailto:bui.anastasiya@gmail.com), [v.dashkevich@dragon.bas-net.by](mailto:v.dashkevich@dragon.bas-net.by), [v.orlovich@dragon.bas-net.by](mailto:v.orlovich@dragon.bas-net.by)

<sup>2</sup> Унитарное предприятие «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, Беларусь,  
e-mail: [shkad@lemt.by](mailto:shkad@lemt.by)

Предложен способ увеличения выходной энергии внерезонаторного ВКР-лазера с двухпроходной накачкой. Способ основан на повторном возврате истощенной накачки в зону ВКР-генерации и демонстрируется на примере безопасных для глаз ВКР-лазеров на кристалле KGW, накачиваемом импульсным многомодовым излучением KGW:Nd-лазера с рабочим переходом  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  в геометриях  $E \parallel N_g$  и  $E \parallel N_m$ . При возврате в ВКР-лазер 70 % истощенной накачки КПД генерации безопасного для глаз излучения на длинах волн 1507 и 1538 нм возрастает примерно на 11 %.

*Ключевые слова:* вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), внерезонаторный ВКР-лазер, двухпроходная накачка, повторное возвращение истощенной накачки, безопасное для глаз излучение.

A. A. RUSAK<sup>1</sup>, U. I. DASHKEVICH<sup>1</sup>, V. A. ORLOVICH<sup>1</sup>, A. P. SHKADAREVICH<sup>2</sup>

**INCREASING THE OUTPUT ENERGY OF THE RAMAN LASER BY A REPEATED  
USE OF A DEPLETED PUMP**

<sup>1</sup> B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: [bui.anastasiya@gmail.com](mailto:bui.anastasiya@gmail.com), [v.dashkevich@dragon.bas-net.by](mailto:v.dashkevich@dragon.bas-net.by), [v.orlovich@dragon.bas-net.by](mailto:v.orlovich@dragon.bas-net.by)

<sup>2</sup> Unitary Enterprise "STC "LEMT" of the BelOMO", Minsk, Belarus, e-mail: [shkad@lemt.by](mailto:shkad@lemt.by)

A method for increasing the output energy of an extracavity Raman laser with a double-pass pump is proposed. The method is based on the repeated recovery of a depleted pump in the zone of SRS generation and is demonstrated by the example of eye-safe Raman lasers with a KGW crystal pumped at geometries of  $E \parallel N_g$  and  $E \parallel N_m$  by pulsed multimode radiation of a Nd:KGW-laser with a  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  working transition. When returning 70 % of a depleted pump in the Raman laser, an efficiency of generation of eye-safe radiation at wavelengths of 1507 and 1538 nm increases by approximately 11 %.

*Keywords:* stimulated Raman Scattering (SRS), extracavity SRS-laser, double-pass pump, repeated return of a depleted pump, eye-safe radiation.

**Введение.** Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) широко применяется в лазерной технике для генерации когерентного излучения в безопасном для глаз диапазоне спектра 1,4–1,8 мкм. Один из методов получения безопасного для глаз излучения основан на возбуждении генерации Nd-содержащих лазеров на переходе  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  и последующем нелинейно-оптическом преобразовании излучения генерации с помощью ВКР-лазера, генерирующего первую стоксову компоненту. ВКР-лазер может быть размещен непосредственно в резонаторе лазера накачки, оконечные зеркала которого являются высокоотражающими на длине волны лазерного излучения [1, 2]. В силу высокой мощности возбуждающего излучения в резонаторе данный подход обеспечивает преодоление порога ВКР-генерации при невысоких уровнях накачки лазерного элемента. Этот метод обычно используется либо в малогабаритных системах с ограниченной мощностью накачки, либо в системах с высокой ( $10^4$ – $10^5$  Гц) частотой следования импульсов [3, 4], когда промежуток времени, отведенный на создание инверсной населенности в Nd-содержащих лазерных элементах, мал и поэтому получать высокие мощности возбуждающего излучения затруднительно. Однако размещение ВКР-лазера внутри резонатора лазера накачки имеет ряд

недостатков, среди которых в первую очередь следует выделить риск разрушения внутррезонаторных элементов при срыве процесса вынужденного комбинационного рассеяния. Поэтому при необходимости генерации более мощных импульсов с вполне определенными параметрами излучения обычно применяются ВКР-лазеры, расположенные вне резонатора возбуждающего лазера. Как правило, в ВКР-лазерах используется выходное зеркало с высоким отражением возбуждающего излучения, что обеспечивает обход резонатора этим излучением и, как следствие, примерно двукратное снижение порога возбуждения вынужденного комбинационного рассеяния и увеличение КПД ВКР-генерации. Однако в случае двухпроходной накачки следует позаботиться об устранении между ВКР-лазером и возбуждающим лазером положительной обратной связи, наличие которой приводит к превращению рассматриваемой системы в конструкцию, аналогичную расположению ВКР-лазера внутри резонатора лазера накачки.

Ясно, что обратная связь отсутствует при однопроходном режиме накачки, когда выходное зеркало линейного или кольцевого ВКР-лазера прозрачно на длине волны излучения накачки [5, 6]. При двухпроходной накачке паразитная обратная связь устраняется либо установкой между возбуждающим лазером и ВКР-лазером оптического вентиля на основе вращателя Фарадея [7], либо наклоном оси резонатора ВКР-лазера на угол, при котором отраженное от выходного зеркала ВКР-лазера излучение не попадает в активный лазерный элемент [8].

В случае использования для развязки вращателя Фарадея наибольшая эффективность ВКР-генерации достигается при встречном коллинеарном распространении падающего на среду и отраженного пучков накачки. Если обратная связь между лазерами устраняется путем наклона оси резонатора, объем возбуждающего излучения в каустике резонатора ВКР-лазера несколько уменьшается. Однако при этом несколько сглаживаются неоднородности пучка накачки (если он многомодовый), что положительно сказывается на поперечном распределении стокового излучения. Необходимо отметить, что квантовый КПД ВКР-лазеров, как правило, не превышает 40–70 %, поэтому выходящее из резонатора ВКР-лазера истощенное излучение накачки обладает достаточно большой энергией. Если длительность импульса возбуждающего излучения превышает время обхода промежутка между лазерами, то возможно повторное возвращение истощенного излучения накачки в ВКР-лазер, что способно увеличить энергию стоковых импульсов. Предлагаемый метод повышения выходной энергии поясняется на рис. 1, а. Поскольку выходное зеркало ВКР-лазера является глухим для излучения накачки, то для исключения обратной связи его и дополнительное зеркало, возвращающее истощенную накачку, следует устанавливать так, чтобы излучение истощенной и дважды истощенной накачки не попадало в апертуру лазера накачки.

В литературе не содержится сведений о предлагаемом методе повышения энергии ВКР-лазера при двухпроходном режиме накачки и дополнительном (повторном) возвращении истощенной накачки в ВКР-лазер. Цель настоящей работы – экспериментальная проверка эффективности данного метода на примере внрезонаторного безопасного для глаз ВКР-лазера на кристалле  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  (KGW), излучающего стоковые компоненты при накачке KGW:Nd-лазером с рабочим переходом  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ .

**Экспериментальная часть.** Накачка ВКР-лазера осуществлялась таким же многомодовым KGW:Nd-лазером, что и в [6]. При энергии питания газоразрядной лампы  $\sim 10$  Дж используемый KGW:Nd-лазер накачки излучал на длине волны 1351 нм импульсы с энергией  $\sim 35$  мДж и длительностью на уровне 0,5 максимальной интенсивности (FWHM)  $\sim 20$ –21 нс. Принципиальная часть оптической схемы исследованного лазерного источника с возвращением истощенной накачки в ВКР-лазер приведена на рис. 1, б. Из элементов лазера накачки показаны лишь активный кристалл KGW:Nd и выходное зеркало  $M_{\text{нак}}$ , которое выполняло также функции дополнительного зеркала (рис. 1, а), повторно возвращающего излучение истощенной накачки (см. рис. 1, б, направление Б), поскольку его коэффициент отражения на  $\lambda_{\text{нак}} = 1351$  нм достаточно высок:  $\sim 70$  %. Лазер накачки и ВКР-лазер, резонатор которого образован плоским входным зеркалом  $M_{\text{вх}}$ , прозрачным для излучения накачки ( $T \sim 97$  %), и вогнутым выходным зеркалом  $M_{\text{вых}}$ , непрозрачным на  $\lambda_{\text{нак}} = 1351$  нм ( $R \sim 99,9$  %), оптически связаны посредством уменьшающего

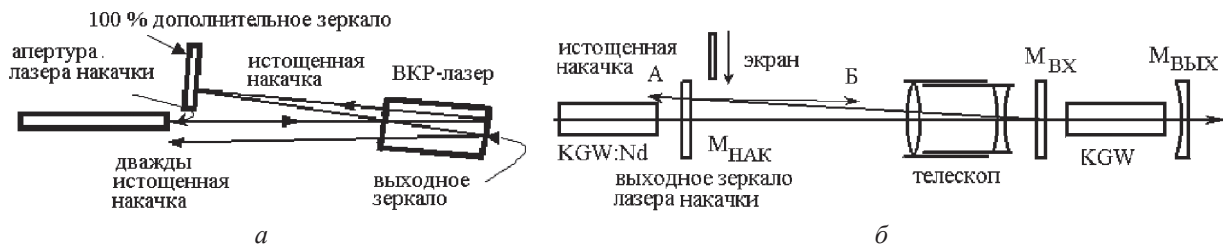


Рис. 1. Распространение основного лазерного излучения при возвращении истощенной накачки в ВКР-лазер (а) и фрагмент схемы лазерного источника с повышенной энергией ВКР-импульса (б)

телескопа, расположенного перед ВКР-лазером окуляром в сторону зеркала  $M_{\text{ВХ}}$ . Линзы телескопа, просветленные на длине волны 1351 нм, имеют фокусные расстояния 15 и  $-5,573$  см. В эксперименте расстояние между выходным зеркалом  $M_{\text{НАК}}$  КГВ:Nd-лазера накачки и входным зеркалом ВКР-лазера  $M_{\text{ВХ}}$  составляло  $L \sim 90$  см.

Зеркала ВКР-лазера и линзы телескопа, допускающие расстройку, располагались следующим образом: во-первых, пучок накачки в ВКР-лазере сужался настолько, что обеспечивал высокий КПД ВКР-генерации; во-вторых, выходящий из ВКР-лазера пучок истощенной накачки не попадал в КГВ:Nd-элемент (рис. 1, б, точка А) и имел на выходном зеркале  $M_{\text{НАК}}$  поперечный размер, соизмеримый с размером сечения выходного пучка КГВ:Nd-лазера; в-третьих, отраженное от зеркала  $M_{\text{НАК}}$  излучение истощенной накачки вновь попадало в ВКР-лазер в зону генерации. Работа ВКР-лазера в режиме только однократного истощения накачки обеспечивалась установкой экрана, предотвращающего попадание выходящего из ВКР-лазера пучка на зеркало  $M_{\text{НАК}}$ .

В ВКР-лазере использовался кристалл КГВ  $b$ -среза длиной 50 мм и диаметром 5 мм. Торцы кристалла имели просветляющие покрытия для длин волн 1300–1600 нм. Лазер был исследован при геометриях возбуждения  $E \parallel N_g$  и  $E \parallel N_m$ , переход между которыми осуществлялся поворотом кристалла КГВ на  $90^\circ$  вокруг своей оси. В том случае, когда электрический вектор излучения накачки  $E$  параллелен оси оптической индикатрисы  $N_g$ , наиболее сильной в кристалле КГВ является фоновая мода с частотой  $767 \text{ см}^{-1}$  [9]. При  $\lambda_{\text{НАК}} = 1351$  нм данная мода обеспечивала генерацию первой стоксовой компоненты на  $\lambda_{\text{1St}} = 1507$  нм. Для этой рабочей длины волны коэффициент отражения выходного зеркала ВКР-лазера равнялся 50 %. Радиус кривизны зеркала  $M_{\text{ВЫХ}}$  составлял  $r_{\text{ВЫХ}} = 312$  мм. При  $E \parallel N_g$  ВКР-генерация с участием более слабой линии со сдвигом частоты  $901 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda_{\text{1St}} = 1538$  нм) не наблюдалась, поскольку в данной спектральной области коэффициент отражения выходного зеркала  $M_{\text{ВЫХ}}$  равнялся 5 %.

Геометрия накачки  $E \parallel N_m$  обеспечивает в ВКР-лазере единственный стоксов сдвиг частоты  $901 \text{ см}^{-1}$  [9]. В этом случае в ВКР-лазере использовалось выходное зеркало, имеющее на длине волны 1538 нм коэффициент отражения 49 %. Радиус кривизны данного зеркала составлял  $r_{\text{ВЫХ}} = 502$  мм. Плоские поверхности подложек выходных зеркал имели просветляющие покрытия для длин волн первой стоксовой компоненты. Во всех экспериментах в ВКР-лазере применялось одно входное плоское зеркало, коэффициент отражения которого в спектральном диапазоне 1500–1600 нм был близок к 100 %. Вторая сторона подложки входного зеркала была просветлена для длины волны 1351 нм. Длина резонатора равнялась 56 мм.

Измерение энергии импульсов проводилось при помощи детектора PE50BV. Для записи осциллограмм излучения использовался цифровой осциллограф Tektronix 3052B и «быстрые» InGaAs  $p-i-n$  фотодиоды. В экспериментах регистрировались интегральные импульсы, т. е. на вход фотоприемника попадало излучение со всего поперечного сечения пучка. Энергия второй стоксовой компоненты измерялась с помощью спектроделителя, полностью отражающего излучение первой стоксовой компоненты и частично пропускающего излучение второй. Энергия первой стоксовой компоненты определялась как разность между полной энергией излучения и энергией второй стоксовой компоненты (измеренное значение, деленное на коэффициент пропускания спектроделителя). Пространственные распределения плотности мощности в выходном пучке регистрировались ПЗС-камерой BeamON-1550 (DUMA OPTRONICS LTD).

**Результаты и их обсуждение.** Для геометрии возбуждения  $E \parallel N_m$  энергетические характеристики ВКР-излучения при наличии и отсутствии отражения истощенной накачки от выходного зеркала КGW:Nd-лазера приведены на рис. 2, а (зависимости 1–3 и 1'–3' соответственно). При построении зависимостей была использована шкала энергий импульса КGW:Nd-лазера. Отражение истощенной накачки от зеркала  $M_{\text{вых}}$  увеличивает интенсивность основного лазерного излучения в ВКР-лазере. Это обстоятельство способствует снижению порога ВКР-генерации с 11,7 до 7,5 мДж. Кроме того, повторное возвращение истощенной накачки в ВКР-лазер приводит к увеличению полной энергии ВКР-импульса  $E_{\text{ВКР}}$  и, соответственно, энергий первой ( $E_{1\text{St}}$ ) и второй ( $E_{2\text{St}}$ ) стоксовых компонент. При максимальной энергии импульса накачки  $E_{\text{нак}} \sim 32$  мДж предложенный метод позволил повысить общую энергию ВКР-импульса с 11,3 до 14,7 мДж, что соответствует увеличению КПД генерации на 10,6 %. При этом энергии  $E_{1\text{St}}$  и  $E_{2\text{St}}$  возросли с 10,5 до 13,3 и с 0,8 до 1,4 мДж соответственно.

Аналогичная ситуация наблюдалась и в случае геометрии накачки  $E \parallel N_g$ . При наличии на пути истощенной накачки экрана ВКР-генерация при  $E_{\text{нак}} \sim 32$  мДж характеризовалась значениями энергий  $E_{\text{ВКР}} = 13,5$  мДж и  $E_{1\text{St}} = 11,7$  мДж, а максимальный КПД генерации равнялся 42,2 % (рис. 2, б, зависимость 1). При повторном возвращении излучения истощенной накачки измерения энергии дали значения  $E_{\text{ВКР}} = 17$  мДж и  $E_{1\text{St}} = 14,6$  мДж, т. е. максимальный КПД ВКР-генерации вырос почти на 11 % и составил 53,1 % (рис. 2, б, зависимость 2). Несмотря на несколько меньшее расчетное значение коэффициента  $g$  стационарного ВКР-усиления для ориентации  $E \parallel N_g$  [9], наблюдаемая эффективность ВКР-генерации для данной ориентации оказалась выше, чем для ориентации  $E \parallel N_m$  (рис. 2, б, зависимости 3 и 4). Это объясняется существенным различием радиусов кривизны выходного зеркала ВКР-лазера при генерации на длинах волн 1,507 и 1,538 мкм. Расчеты на основе закона  $ABCD$  с учетом геометрии эксперимента и параметров пучка КGW:Nd-лазера накачки показали, что при  $r_{\text{вых}} = 502$  мм ( $\lambda_{1\text{St}} = 1538$  нм) диаметр пучка при обходе излучением накачки ВКР-резонатора изменялся не более чем на 5 %, достигая своего максимума на выходном зеркале ВКР-лазера. При этом диаметры пучка на входе и выходе из ВКР-кристалла были практически идентичными. В случае  $r_{\text{вых}} = 312$  мм диаметр пучка накачки при повторном прохождении кристалла КGW уменьшался в большей степени, и, таким образом, средняя интенсивность накачки  $I_{\text{н}}^{\text{CP}}$  при обходе резонатора и, соответственно, усиление в ВКР-лазере (равное  $\exp(g I_{\text{н}}^{\text{CP}} l_{\text{КGW}})$ , где  $l_{\text{КGW}}$  – длина кристалла) были выше, чем в случае  $r_{\text{вых}} = 502$  мм.

При повторном возвращении истощенной накачки в схеме, приведенной на рис. 1, б, интенсивность накачки на входе в ВКР-лазер в момент времени  $t$  равна  $I_{\text{нак}}(t) + 0,7 I_{\text{иснак}}(t - 2L/c)$ , где

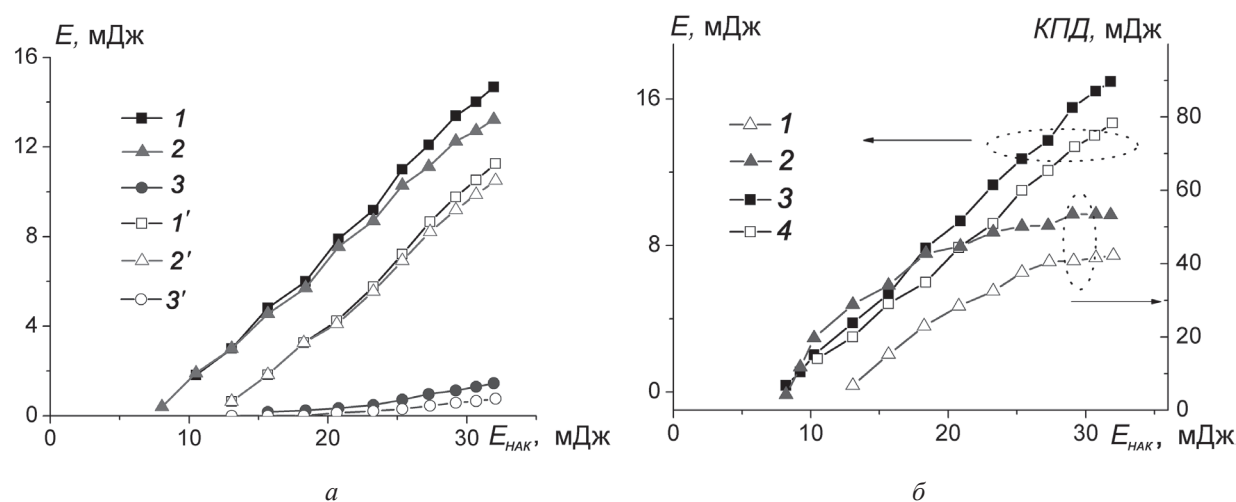
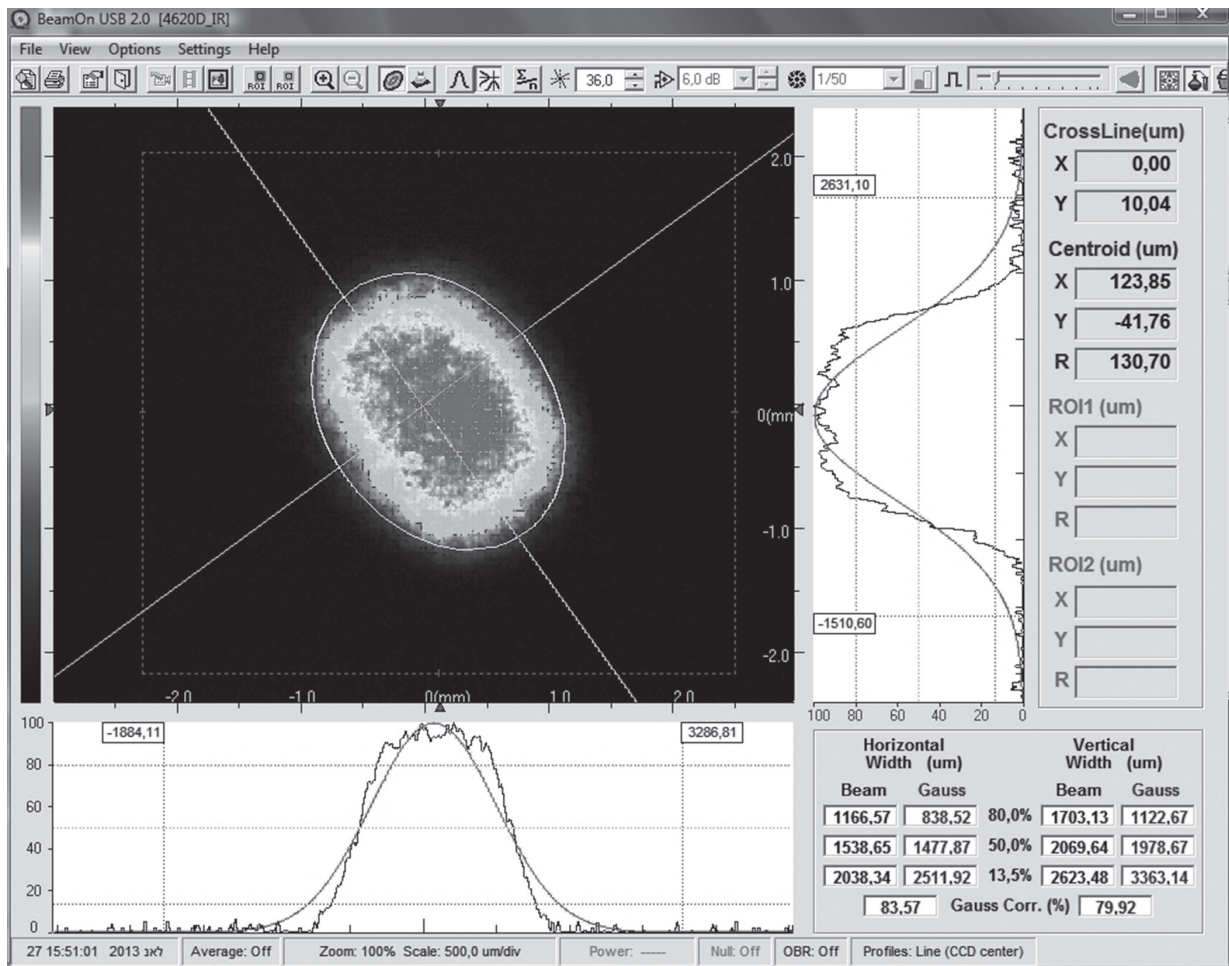


Рис. 2. Зависимости общих энергий ВКР-импульса ( $I$ ,  $I'$ ) а также энергий первых (2, 2') и вторых (3, 3') стоксовых компонент от энергии импульса КGW:Nd-лазера при наличии (1–3) и отсутствии (1'–3') повторного возвращения истощенной накачки (а) и зависимости КПД ВКР-генерации при отсутствии (1) и наличии (2) повторного возвращения истощенной накачки и общих энергий ВКР-импульсов при возвращении истощенной истощенности накачки в геометриях  $E \parallel N_g$  (3) и  $E \parallel N_m$  (4) от энергии импульса КGW:Nd-лазера (б)



a

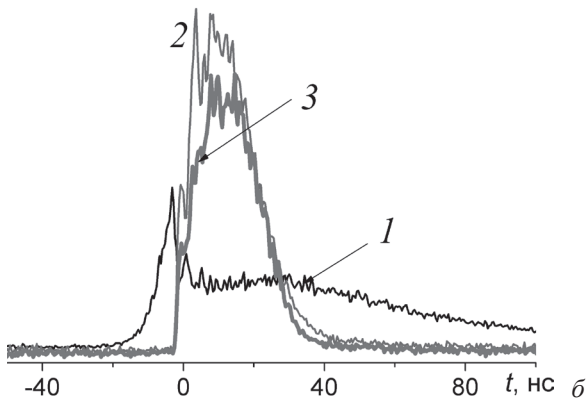


Рис. 3. Осциллограммы импульса истощенной накачки в точке А на рис 1, а при наличии ее отражения от зеркала  $M_{\text{нак}}$  (1) и импульсов первой стоксовой компоненты при наличии (2) и отсутствии (3) повторного возвращения истощенной накачки в ВКР-лазер (б) и пространственное распределение интенсивности пучка ВКР-лазера в ближнем поле при накачке в геометрии  $E \parallel N_m$  (а) с повторным возвращением истощенной накачки

$I_{\text{нак}}(t)$  – интенсивность импульса KGW:Nd-лазера,  $I_{\text{иснак}}$  – интенсивность истощенной накачки, вышедшей из резонатора ВКР-лазера в более ранний момент времени. На рис. 3, б представлена осциллограмма импульса истощенной накачки  $I$ , зарегистрированная с использованием излучения в точке А, и записанная синхронно с ней осциллограмма импульса первой стоксовой компоненты 2. Эти осциллограммы относятся к случаю, когда накачка после первого акта истощения повторно возвращалась в ВКР-лазер. Можно видеть, что до момента возникновения ВКР-генерации нарастание мощности лазерного излучения на  $\lambda = 1351$  нм занимает  $\sim 15$  нс. При  $L \sim 90$  см этот временной интервал в несколько раз превышает время обхода излучением накачки, вышедшим из ВКР-лазера, промежутка между зеркалами  $M_{\text{вх}}$  и  $M_{\text{нак}}$ . Следовательно, дополнительное отражение накачки от выходного зеркала KGW:Nd-лазера способно увеличивать

ее мощность в ВКР-лазере еще до момента возбуждения вынужденного комбинационного рассеяния, что, как было показано выше, приводит к снижению порога ВКР-генерации.

При регистрации импульсов первой стоксовой компоненты использовалось ВКР-излучение, прошедшее через соответствующий интерференционный фильтр. Помимо огибающей импульса 2 на рис. 3, б представлена огибающая ВКР-импульса 3, генерируемого в режиме без возвращения истощенной накачки. Провалы интенсивности на переднем фронте и в области вершины импульсов указывают на присутствие в ВКР-генерации второй стоксовой компоненты. Длительности импульсов (FWHM) первой стоксовой компоненты составляют  $\sim 20$  нс и практически соответствуют длительности импульса лазера накачки, что указывает на внрезонаторный характер ВКР-преобразования при обоих способах использования истощенной накачки. Следует отметить, что положение огибающей импульса 3 на временной шкале выбрано произвольно. Реально, в связи с более высоким порогом ВКР-генерации при однократном истощении накачки, начало развития ВКР-импульса 3 в пределах импульса накачки является более поздним, чем импульса 2.

Исследования показали, что при энергии питания лампы накачки  $\sim 10$  Дж выходной пучок KGW:Nd-лазера является эллиптическим, вследствие чего пучок первой стоксовой компоненты также является эллиптическим. Для ближнего поля (на расстоянии 11 см от выходного зеркала  $M_{\text{вых}}$ ) двумерное распределение плотности энергии в пучке первой стоксовой компоненты с длиной волны 1538 нм и одномерные распределения вдоль осей максимального и минимального размеров пучка приведены на рис. 3, а. Как видно, измеренные распределения характеризуются наличием плоской вершины (flat-top) и имеют невысокое качество аппроксимации функцией Гаусса. Эллиптическое распределение плотности энергии наблюдается и в дальней волновой зоне – задней фокальной плоскости собирающей линзы. Эллиптичность распределения составляет 0,68. Расходимость стоксова излучения вдоль малой и большой осей эллипса, в пределах которого сосредоточено 86,5 % полной энергии пучка, равняется 9 и 13,4 мрад соответственно. Необходимо отметить, что здесь указана внутризонаторная расходимость пучка, рассчитанная из реальной расходимости (несколько большей из-за действия подложки выходного зеркала как рассеивающей линзы) с использованием формулы (5.26) из [10]. Практически аналогичная расходимость стоксова пучка наблюдалась и при геометрии накачки  $E \parallel N_g$ . Указанная расходимость стоксова пучка означает, что ВКР-генерация являлась многомодовой.

**Заключение.** Таким образом, в случае устранения обратной оптической связи между лазером накачки и внрезонаторным ВКР-лазером с двухпроходным режимом накачки путем наклона оптической оси резонатора ВКР-лазера относительно оси пучка накачки, энергия стоксова излучения может быть увеличена посредством повторного возврата истощенной накачки (ход которой не совпадает с путем неистощенной накачки) в зону ВКР-генерации. Повторный возврат истощенной накачки эффективен, если время обхода излучением промежутка между лазерами меньше длительности импульса накачки. Предлагаемый метод увеличения энергии стоксовых импульсов продемонстрирован на примере безопасных для глаз внрезонаторных многомодовых ВКР-лазеров на кристалле KGW, излучающих первую стоксову компоненту на длинах волн 1507 и 1538 нм при накачке KGW:Nd-лазером с рабочим переходом  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  в геометриях  $E \parallel N_g$  и  $E \parallel N_m$  соответственно. При повторном возврате с помощью выходного зеркала KGW:Nd-лазера в область ВКР-генерации 70 % истощенной накачки энергии импульсов первых стоксовых компонент и, соответственно, КПД генерации ВКР-лазеров возросли примерно на 11 %. В случае геометрии возбуждения  $E \parallel N_g$ , при которой средняя интенсивность излучения накачки при обходе резонатора из-за меньшего радиуса кривизны выходного зеркала была несколько выше, чем в случае  $E \parallel N_m$ , полная энергия импульса ВКР-лазера при энергии импульса накачки  $\sim 32$  мДж составила 17 мДж. При этом энергия первой стоксовой компоненты равнялась 14,6 мДж. Длительность стоксовых импульсов ( $\sim 20$  нс), сравнимая с длительностью импульса накачки, осталась такой же, как и при ВКР-генерации без повторного возвращения истощенной накачки, что наглядно свидетельствует о внрезонаторном расположении ВКР-лазеров. По нашему мнению, эффективное действие предлагаемого метода в случае ВКР-лазера обусловлено тем, что процесс ВКР не требует выполнения условий фазового синхронизма.

## Список использованной литературы

1. Generation of 1.5- $\mu\text{m}$  radiation through intracavity solid-state Raman shifting in  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  nonlinear crystals / J. T. Murray [et al.] // *Opt. Lett.* – 1995 – Vol. 20. – P. 1017–1019.
2. Stimulated Raman Scattering Laser Oscillation around 1.6 $\mu\text{m}$  Carbon Dioxide Absorption Line / D. Sakaizawa [et al.] // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 47. – P. 1612–1614.
3. High-efficiency eye-safe intracavity Raman laser at 1531 nm with  $\text{SrWO}_4$  crystal / Y. X. Fan [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2008. – Vol. 93. – P. 327–330.
4. Eye-safe actively Q-switched diode-pumped lasers with Intracavity Raman conversion in  $\text{YVO}_4$ ,  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{PbWO}_4$ , and  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  crystals / V. I. Dashkevich [et al.] // *Opt. Commun.* – 2015. – Vol. 35. – P. 11–8.
5. Zverev, P. G. Stimulated Raman scattering of laser radiation in Raman crystals / P. G. Zverev, T. T. Basiev, A. M. Prokhorov // *Opt. Mater.* – 1999. – Vol. 11. – P. 335–352.
6. Dashkevich, V. I. Ring solid-state laser at 1538 nm / V. I. Dashkevich, V. A. Orlovich // *Laser Phys. Lett.* – 2011. – Vol. 8, no 9. – P. 661–667.
7. SRS Transformation of the Radiation of a Self-Pumped Phase-Conjugate Laser / T. T. Basiev [et al.] // *Laser Phys.* – 2003. – Vol. 13. – P. 1013–1016.
8. High average power generation in barium nitrate Raman laser / V. A. Lisinetskii [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2010. – Vol. 99. – P. 127–134.
9. Мочалов, И. В. Нелинейная оптика лазерного кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата, активированного неодимом  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$  / И. В. Мочалов // *Оптич. журн.* – 1995. – № 11. – С. 4–15.
10. Hodson, N. *Laser Resonators and Beam Propagation: Fundamentals, Advanced Concepts and Applications* / N. Hodson, H. Weber. – 2 ed. – USA: Springer, 2005.

Поступила в редакцию 07.07.2016