

Четырехволновая генерация ВКР-компонент излучения в кристаллах $BaWO_4$ и $SrWO_4$ при пикосекундном возбуждении

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, Л.И.Ивлева, С.Н.Сметанин, М.Елинек, В.Кубечек, Х.Елинкова

Проведено исследование четырехволновой ВКР-генерации стоксовых и антистоксовых компонент излучения в кристаллах $BaWO_4$ и $SrWO_4$ при возбуждении импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 18 пс. Показано, что благодаря четырехволновым взаимодействиям ВКР-компонент излучения в коротких кристаллах (~ 1 см) пороги генерации второй и третьей стоксовых компонент существенно меньше значений, определяемых каскадным механизмом ВКР. При увеличении длины кристалла более чем в четыре раза механизм многоволнового ВКР становится близким к каскадному без участия четырехволновых взаимодействий. Вращение кристалла $BaWO_4$ позволило управлять конкуренцией четырехволновой ВКР-генерации антистоксовой и второй стоксовой компонент излучения.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, четырехволновое взаимодействие, стоксовы и антистоксовы компоненты излучения.

1. Введение

Новая волна интереса к кристаллическим ВКР-лазерам возникла в начале 2000-х гг., когда была разработана технология синтеза и выращивания крупных кристаллов вольфраматов бария и стронция [1–5], обладающих высокими пиковыми и интегральными сечениями ВКР-усиления и позволяющих создавать мощные и компактные твердотельные ВКР-лазеры [6–37]. Многокаскадная генерация ВКР-компонент излучения высокого порядка при использовании данных кристаллов, имеющих к тому же широкий диапазон прозрачности, может обеспечить дальнейшее продвижение в ИК область спектра вплоть до края прозрачности активного ВКР-материала [23]. Однако реализация каскадной генерации высших стоксовых компонент излучения ограничена снижением коэффициента ВКР-усиления [19] и порогом лучевой стойкости ВКР-среды.

Одним из путей реализации ВКР в ИК диапазоне спектра является уменьшение длительности импульсов накачки до пикосекунд, за счет чего существенно возрастает лучевая стойкость ВКР-среды и, следовательно, появляется возможность увеличения интенсивности накачки выше пороговой при однопроходном ВКР даже в случае короткой среды. При этом могут быть соблюдены условия для параметрической четырехволновой связи ВКР-компонент, что снижает пороги их генерации [38–40]. Однако режим ВКР становится нестационарным, т. к. длительность импульса накачки оказывается сравнимой с временем дефазировки оптических фононов, а это повы-

шает пороги ВКР-генерации [16]. Данные конкурирующие процессы требуют детального анализа при сравнительном исследовании многоволнового ВКР в кристаллах при пикосекундной накачке.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование четырехволновой ВКР-генерации в кристаллах вольфраматов бария и стронция при накачке пикосекундным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка показана на рис. 1. Накачка кристаллов $BaWO_4$ и $SrWO_4$ проводилась лабораторной генераторно-усилительной лазерной системой, излучающей на длине волны $\lambda_L = 1064$ нм. Применялся лазерный Nd:YAG-генератор с квазинепрерывной диодной накачкой и пассивной синхронизацией мод полупроводниковым насыщающимся поглотителем. При использовании режима разгрузки резонатора лазерный осциллятор генерировал одиночные лазерные импульсы с энергией 20 ± 2 мкДж и вертикальной линейной поляризацией. Выходной пучок излучения имел профиль, близкий к гауссову по обеим поперечным координатам. Длительность импульсов, измеренная стрик-камерой, составила 18 ± 2 пс. Подробное описание лазерной установки представлено в [41].

Для увеличения энергии генерируемых лазерных импульсов применялся однопроходный лазерный Nd:YAG-усилитель с ламповой накачкой. Максимальная энергия усиленного лазерного импульса на входе накачиваемого ВКР-кристалла ($BaWO_4$ или $SrWO_4$) составила 2 мДж при нестабильности 10% от импульса к импульсу. Лазерный пучок на выходе усилителя имел диаметр ~ 1.5 мм и параметр качества $M^2 \approx 1.8$. Длительность лазерного импульса не изменялась при усилении. Использовалась частота следования лазерных импульсов до 3 Гц.

Для увеличения интенсивности лазерного излучения поперечное сечение пучка было уменьшено до $3.1 \times$

Т.Т.Басиев, М.Е.Дорошенко, Л.И.Ивлева, С.Н.Сметанин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: smetanin@bk.ru
M. Jelínek, V. Kuběček, H. Jelínková. Czech Technical University, 11519 Prague, 1, Břehova, 7, Czech Republic

Поступила в редакцию 1 августа 2012 г., после доработки – 4 февраля 2013 г.

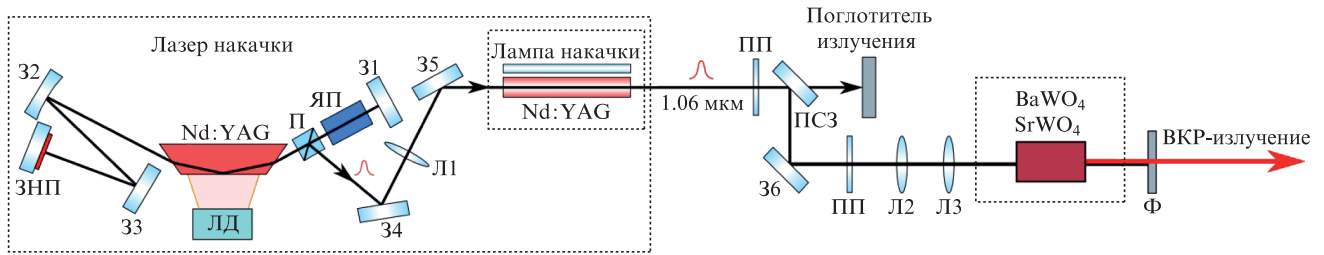


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки:

31–36 – зеркала; Л1–Л3 – линзы; ЗНП – зеркало с насыщающимся поглотителем; ЯП – ячейка Погкельса; П – поляризатор; ПП – полуволновая пластинка; ПСЗ – поляризационное светоделительное зеркало; Ф – фильтр; ЛД – лазерный диод.

10^{-3} см^2 (по уровню e^{-2} от максимальной интенсивности) с помощью телескопической системы, состоящей из двух собирающих линз – Л2 ($f = 100 \text{ мм}$) и Л3 ($f = 50 \text{ мм}$). Спектр ВКР-излучения измерялся спектрометром Ocean Optics NIR512 (диапазон длин волн 850–1700 нм, разрешение 3 нм). Лазерное излучение накачки пропусклось через фильтр из кремниевой пластины или фильтр Thorlabs FEL1150. Одновременно осуществлялось прецизионное измерение энергии лазерных импульсов накачки измерителем мощности и энергии Coherent FieldMax II при ответвлении части лазерного излучения полуволновой пластинкой и поляризатором, установленными на выходе лазерного усилителя.

Исследованные ВКР-кристаллы BaWO_4 и SrWO_4 были выращены в Научном центре лазерных материалов и технологий ИОФ РАН.

3. Пороги генерации первой, второй и третьей стоксовых ВКР-компонент излучения в кристаллах BaWO_4 и SrWO_4

Кристаллы BaWO_4 и SrWO_4 имели размеры 0.8 и 1.1 см в направлении оптической оси, а также 1.2 и 4.7 см в перпендикулярном направлении соответственно. Торцы кристаллов были отполированы для реализации накачки в обоих этих направлениях.

В настоящей работе измерялись экспериментальные пороги генерации различных ВКР-компонент излучения. Нужно отметить, что хотя в отсутствие собственных потерь процесс ВКР не имеет порога, но фактически существует экспериментальный порог, обусловленный тем, что на начальном этапе интенсивность ВКР-излучения очень быстро экспоненциально нарастает. При стационарном ВКР инкремент данного нарастания $G_0 = gI_L L$ [11], где g – коэффициент ВКР-усиления; I_L – интенсивность излучения накачки; L – длина взаимодействия. При нестационарном ВКР нарастание интенсивности ВКР-излучения остается экспоненциальным, но происходит медленнее. Например, в пределе больших коэффициентов усиления для прямоугольного импульса накачки инкремент экспоненциального нарастания $G = (4G_0\tau_L/\tau_R)^{1/2}$ [42], где τ_R – время дефазировки оптических фононов; τ_L – длительность лазерного импульса накачки. Экспериментальный порог ВКР обычно связывают с условиями, при которых излучение накачки заметно истощается [3, 11, 43]. Хорошо известно, что для большинства типов вынужденного рассеяния света, в том числе и для ВКР, при инкременте нарастания $G \approx 30$ интенсивность ВКР-излучения становится соизмеримой с интенсивностью излучения накачки ($I_S \approx I_L$), а уменьшение последней на 20% (при уменьше-

нии G до 24) приводит к уменьшению интенсивности ВКР-излучения в $e^{30/e^{24}} \approx 400$ раз [43]. Условно в качестве порогового инкремента G_{th} можно выбрать значение 25 [11], при котором интенсивность ВКР-излучения в $e^{30/e^{25}} \approx 100$ раз меньше интенсивности излучения накачки. Тогда экспериментально порог ВКР можно определять как ситуацию, в которой интенсивность стоксовой компоненты достигает 1% от интенсивности накачки. Пороги ВКР-генерации высших стоксовых компонент для общности можно определять таким же образом.

Экспериментальные пороги генерации ВКР-компонент излучения мы регистрировали при наблюдении спектра ВКР-излучения и одновременном измерении энергии лазерного излучения накачки. Увеличивая энергию накачки, мы регистрировали ее пороговые значения W_{th} , соответствующие указанному выше критерию. При этом погрешность измерения пороговых энергий накачки для генерации ВКР-компонент не зависела от нестабильности работы лазера накачки и снижалась до приборной ошибки (менее 5%). Нужно отметить, что погрешность оценки порога по интенсивности (которая определяет инкремент нарастания G) зависела также от погрешностей оценки поперечного сечения пучка ($\sim 10\%$) и длительности импульса (11%), т.е. суммарная погрешность определения пороговой интенсивности ВКР-генерации составляла $\sim 26\%$.

Сначала мы проводили накачку вдоль оптической оси с кристаллов BaWO_4 и SrWO_4 , т.е. $k \parallel c$, $E \perp c$. В кристалле BaWO_4 пороговая энергия W_{th1} излучения накачки для генерации первой стоксовой ВКР-компоненты с длиной волны $\lambda_1 = 1181 \text{ нм}$ (комбинационный сдвиг частоты 926 см^{-1} [4]) составила $0.93 \pm 0.05 \text{ мДж}$. Для кристалла SrWO_4 порог генерации первого стока с длиной волны $\lambda_1 = 1178 \text{ нм}$ (комбинационный сдвиг частоты 921 см^{-1} [4]) наблюдался при $W_{th1} = 0.69 \pm 0.04 \text{ мДж}$.

Пороговая энергия W_{th2} накачки для генерации второй стоксовой ВКР-компоненты с длиной волны $\lambda_2 = 1325$ и 321 нм составила 1.27 ± 0.06 и $0.98 \pm 0.05 \text{ мДж}$ в кристаллах BaWO_4 и SrWO_4 соответственно. Для третьей ВКР-компоненты ($\lambda_3 = 1511 \text{ нм}$ для BaWO_4 и 1504 нм для SrWO_4) пороговая энергия накачки $W_{th3} = 1.83 \pm 0.09$ и $1.82 \pm 0.09 \text{ мДж}$ в кристаллах BaWO_4 и SrWO_4 соответственно.

Далее мы проводили накачку в направлении, перпендикулярном оптической оси кристалла BaWO_4 или SrWO_4 при поляризации излучения накачки, параллельной оптической оси кристаллов, т.е. $k \perp c$, $E \parallel c$. В кристалле BaWO_4 с длиной $L = 1.2 \text{ см}$ пороговые энергии накачки были следующими: $W_{th1} = 0.48 \pm 0.02 \text{ мДж}$, $W_{th2} = 0.63 \pm 0.03 \text{ мДж}$ и $W_{th3} = 1.06 \pm 0.05 \text{ мДж}$ для ВКР-генерации первого, второго и третьего стоков соответственно. Для кристалла SrWO_4 , который имел значительно большую длину

($L = 4.7$ см) при данном направлении накачки, пороговые энергии накачки $W_{th1} = 0.16 \pm 0.01$ мДж, $W_{th2} = 0.36 \pm 0.02$ мДж и $W_{th3} = 1.44 \pm 0.07$ мДж для ВКР-генерации первого, второго и третьего стоксов соответственно.

Таким образом, в кристалле $BaWO_4$, длина которого в обоих направлениях накачки была близка к 1 см, пороговая энергия накачки для генерации второго стока превышает таковую для генерации первого стока менее чем в два раза, а именно в $W_{th2}/W_{th1} = 1.33-1.36$ раз. Для генерации третьего стока отношение $W_{th3}/W_{th1} = 1.96-2.21$. Отношения пороговых энергий W_{th2}/W_{th1} и W_{th3}/W_{th1} оказались ниже, чем это следует из каскадного механизма ВКР-преобразования, при котором должны выполняться условия $W_{th2}/W_{th1} \geq 2$ и $W_{th3}/W_{th1} \geq 3$, т.е. генерация второго (третьего) стока должна начинаться только после того, как интенсивность первого (второго) стока достигнет значения, сравнимого с интенсивностью излучения накачки (первого стока) [39]. Можно сделать вывод о влиянии четырехволновых взаимодействий, снижающих пороги высших стоксовых компонент по сравнению со значениями, определяемыми каскадным механизмом ВКР.

Для кристалла $SrWO_4$ длиной 1.1 см при накачке в направлении его оптической оси пороги генерации второго и третьего стоксов больше порога генерации первого стока в 1.4 и 2.6 раза соответственно, т.е. здесь также присутствуют четырехволновые взаимодействия, снижающие пороги генерации высших стоксовых ВКР-компонент.

4. Анализ четырехволновой ВКР-генерации высших стоксовых компонент в кристаллах $BaWO_4$ и $SrWO_4$

В работах [38,39] показано, что снижение порога ВКР-генерации второго стока может объясняться наличием частично вырожденного четырехволнового взаимодействия волн накачки, а также первого и второго стоксов в условиях пространственно ограниченного захвата фаз, если $\Delta k L < 300$, где Δk – расстройка волновых векторов при таком взаимодействии. Волновая расстройка определяется выражением [39]

$$\Delta k = (n_0 + n_2 - 2n_1)2\pi\lambda_1^{-1} + (n_0 - n_2)2\pi\nu_R, \quad (1)$$

где n_0 , n_1 и n_2 – показатели преломления для волны накачки, первой и второй стоксовых ВКР-компонент соответственно; ν_R – комбинационный сдвиг частоты. Волновая расстройка Δk (1) уменьшается при уменьшении дисперсии показателя преломления и приближении длины вол-

ны λ_1 к длине волны нулевой дисперсии λ_d . Исходя из справочных данных по дисперсии показателя преломления кристаллов $BaWO_4$ и $SrWO_4$ [9, 20], получаем $\Delta k \approx 50$ см⁻¹, тогда $\Delta k L \approx 50$ ($L \approx 1$ см). Анализ, проведенный в [39], показал, что при $\Delta k L \approx 50$ отношения W_{th2}/W_{th1} и W_{th3}/W_{th1} должны составлять ~ 1.3 и ~ 2.0 , что хорошо согласуется с полученными экспериментальными результатами: $W_{th2}/W_{th1} = 1.3-1.4$ и $W_{th3}/W_{th1} = 2.0-2.6$ для кристаллов $BaWO_4$ и $SrWO_4$.

При накачке кристалла $SrWO_4$ длиной 4.7 см в направлении, перпендикулярном его оптической оси, параметр волновой расстройки $\Delta k L > 230$, что препятствует четырехволновой связи стоксовых ВКР-компонент излучения [38,39], поэтому в эксперименте наблюдалось обычное каскадное ВКР-преобразование ($W_{th2}/W_{th1} > 2$ и $W_{th3}/W_{th1} > 3$).

На рис.2 показаны зарегистрированные спектры ВКР-излучения в кристалле $SrWO_4$ длиной 4.7 см, кристалле $BaWO_4$ длиной 1.2 см и в кристалле $BaWO_4$ длиной 0.8 см, соответствующие порогу генерации третьей стоксовой ВКР-компоненты излучения в данных кристаллах.

Из рис.2,а видно, что в кристалле $SrWO_4$, имеющем большую длину (4.7 см), порог генерации третьего стока наблюдается, когда интенсивность второго стока, достигла значения, сравнимого с интенсивностью первого стока. Это характерно для каскадного механизма ВКР-преобразования без участия четырехволнового взаимодействия ВКР-компонент излучения, когда каждая компонента генерируется из предыдущей ВКР-компоненты.

Из рис.2,б видно, что при уменьшении длины ВКР-кристалла до 1.2 см генерация третьего стока начинается, когда интенсивность второго стока еще мала. Это подтверждает наличие параметрических четырехволновых процессов, снижающих пороги генерации высших стоксовых компонент [38], при которых частотное преобразование в третий сток происходит не только из второго стока (каскадный механизм ВКР), но и из более интенсивного первого стока (частично вырожденное четырехволновое взаимодействие при ВКР), а также, возможно, и из волны накачки (невыврожденное четырехволновое взаимодействие при ВКР).

Из рис.2,в видно, что в самом коротком кристалле длиной 0.8 см второй и третий стоксы очень близки по интенсивности, т.е. четырехволновые взаимодействия здесь настолько сильны, что данные ВКР-компоненты генерируются совместно из предыдущих более интенсивных ВКР-компонент (волны накачки и первого стока).

Нужно отметить, что порог генерации третьего стока в кристалле $BaWO_4$ малой длины (1.2 см, рис.2,б) оказался заметно ниже, чем в кристалле $SrWO_4$ в четыре раза

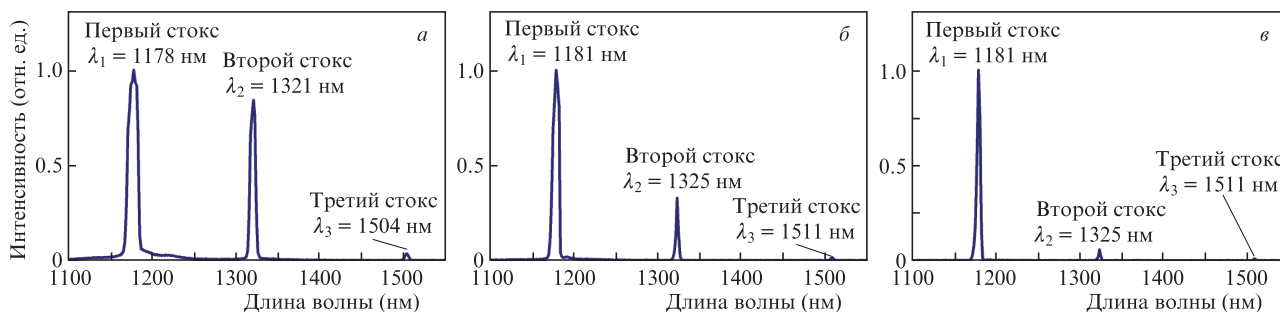


Рис.2. Спектры ВКР-излучения в кристаллах $SrWO_4$ с $L = 4.7$ см, $\nu_R = 921$ см⁻¹ (а) и $BaWO_4$ с $L = 1.2$ см, $\nu_R = 926$ см⁻¹ (б) и $L = 0.8$ см, $\nu_R = 926$ см⁻¹ (в), соответствующие порогу генерации третьей стоксовой ВКР-компоненты.

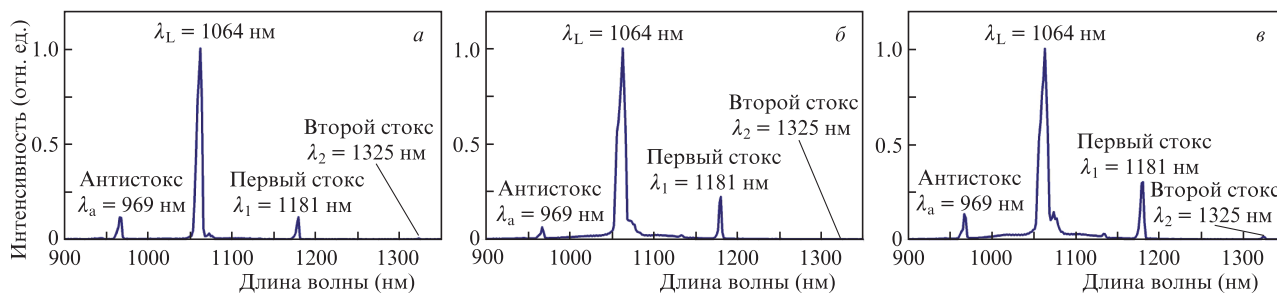


Рис.3. Спектры ВКР-излучения в кристалле BaWO₄ для углов накачки $\Theta = 0$ (а), 20° (б) и 40° (в) при энергии импульса накачки 1.16 мДж.

большей длины (4.7 см, рис.2,а) – $W_{th3} = 1.06$ мДж против 1.44 мДж. Снижение порога ВКР при уменьшении длины ВКР-кристалла демонстрирует практическую значимость реализации четырехволнового взаимодействия ВКР-компонент излучения для генерации высших стоксовых компонент. В кристалле SrWO₄ большой длины порог генерации третьего стокса оказался аномально высоким даже для каскадного механизма ВКР-генерации – $W_{th3}/W_{th1} = 8.5$ вместо расчетного значения 3.3 при $\Delta kL = 230$ [39]. Возможное объяснение данного факта состоит в том, что в нашем эксперименте в кристалле SrWO₄ большой длины наблюдалась совместно с третьим стоксом ($\lambda_3 = 1504$ нм) генерация неизвестной компоненты излучения с длиной волны 1673 нм. Эта компонента не является четвертым стоксом, имеющим комбинационный сдвиг 921 см^{-1} , т.к. его длина волны должна быть больше ($\lambda_4 = 1746$ нм). Объяснение может быть связано с ВКР-генерацией первого стокса с неизвестным комбинационным сдвигом 1594 см^{-1} (измерения комбинационных спектров в [4] проводились для сдвигов менее 1000 см^{-1}) от высокоинтенсивной компоненты с длиной волны $\lambda_2 = 1321$ нм. Нужно отметить, что при увеличении энергии накачки выше 1.44 мДж (порог генерации третьего стокса) интенсивность третьего стокса была почти неизменной и низкой даже при максимальной энергии накачки (2 мДж). Это объясняется оттоком энергии в одновременный процесс ВКР-генерации излучения с длиной волны 1673 нм.

5. Управление четырехволновой ВКР-генерацией антистокса и второго стокса при вращении кристалла BaWO₄

Недавно нами было предложено [44] стимулировать четырехволновые взаимодействия при ВКР путем ориентирования двулучепреломляющего кристалла относительно направления накачки. При этом может быть уменьшена и даже устранена волновая расстройка Δk синхронизма четырехволновых взаимодействий для ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения. В данном случае мы можем оптимизировать четырехволновую генерацию не только высших стоксовых, но и антистоксовых компонент излучения.

При использовании отрицательного одноосного кристалла BaWO₄ оптимизации подлежат частично вырожденные четырехволновые взаимодействия ооо-типа [44], т.е. волна, генерируемая посредством четырехволнового взаимодействия (антистокс или второй стокс), должна быть необыкновенной (е), а остальные волны, участвующие в этом взаимодействии, должны быть обыкновенными (о).

Нами был проведен эксперимент по управлению четырехволновой генерацией ВКР-компонент излучения.

Для этого мы поворачивали кристалл относительно направления пучка накачки на угол Θ . Исходно накачка проводилась вдоль оптической оси кристалла ($k \parallel c$). Поляризация излучения накачки была перпендикулярна плоскости поворота кристалла, поэтому излучение накачки являлось обыкновенной волной.

На рис.3 представлены спектры генерируемых ВКР-компонент в кристалле BaWO₄ при различных Θ и энергии импульса накачки 1.16 мДж, меньшей пороговой для генерации второго стокса ($W_{th2} = 1.27$ мДж).

Из рис.3,а видно, что при $\Theta = 0$, т.е. при накачке вдоль оптической оси кристалла, эффективно происходят четырехволновая генерация антистокса с длиной волны $\lambda_a = (2\lambda_L^{-1} - \lambda_1^{-1})^{-1} = 969$ нм и первого стокса ($\lambda_1 = 1180$ нм). Интенсивность антистоксовой волны близка к таковой для первого стокса, а порог генерации второго стокса не был преодолен.

Увеличение угла Θ до 20° (рис.3,б) приводит к уменьшению интенсивности антистокса и увеличению интенсивности первого стокса. При этом также преодолевается порог генерации второго стокса ($\lambda_2 = 1325$ нм). При дальнейшем увеличении Θ до 40° (рис.3,в) продолжается увеличение интенсивностей первого и второго стокса. К сожалению, еще большее увеличение угла Θ было ограничено геометрией кристалла, однако уже очевидна тенденция к росту интенсивности второго стокса за счет оттока энергии из антистокса.

Таким образом, вращение кристалла BaWO₄ позволило управлять конкуренцией процессов четырехволновой генерации антистокса и второго стокса при ВКР. Увеличение угла между оптической осью кристалла и направлением накачки привело к увеличению интенсивности второго стокса за счет оттока энергии из антистокса.

6. Заключение

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование четырехволновой ВКР-генерации стоксовых и антистоксовых компонент излучения в кристаллах BaWO₄ и SrWO₄ при возбуждении их импульсным лазерным излучением с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 18 пс. Показано, что благодаря четырехволновым взаимодействиям ВКР-компонент излучения в коротких кристаллах длиной ~ 1 см пороги генерации второй и третьей стоксовых компонент существенно меньше значений, определяемых каскадным механизмом ВКР. При увеличении длины ВКР-кристалла более чем в четыре раза механизм многоволнового ВКР становится близким к каскадному без участия четырехволновых взаимодействий. Вращение кристалла BaWO₄ позволило управлять конкуренцией процессов четырехволновой ВКР-генерации антистокса и второго стокса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-00031) и Чешского научного фонда (проект 102/13/08888S).

- Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Ivleva L.I., Osiko V.V., Powell R.C. *Opt. Mater.*, **11**, 307 (1999).
- Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Osiko V.V., Powell R.C. *Appl. Opt.*, **38**, 594 (1999).
- Басиев Т.Т. *УФН*, **169**, 1149 (1999).
- Зверев П.Г., Басиев Т.Т., Соболев А.А., Скорняков В.В., Ивлева Л.И., Полозков Н.М., Осико В.В. *Квантовая электроника*, **30**, 55 (2000).
- Basiev T.T., Sobol A.A., Voronko Yu.K., Zverev P.G. *Opt. Mater.*, **15**, 205 (2000).
- Cerny P., Zverev P.G., Jelinkova H., Basiev T.T. *Opt. Commun.*, **177**, 397 (2000).
- Černý P., Jelínková H. *Opt. Lett.*, **27**, 360 (2002).
- Basiev T.T., Černý P., Jelínková H., Zverev P.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 1471 (2002).
- Voronina I.S., Ivleva L.I., Basiev T.T., Zverev P.G., Polozkov N.M. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **5**, 887 (2003).
- Ivleva L.I., Basiev T.T., Voronina I.S., Zverev P.G., Osiko V.V., Polozkov N.M. *Opt. Mater.*, **23**, 439 (2003).
- Basiev T.T., Osiko V.V., Prokhorov A.M., Dianov E.M. *Top. Appl. Phys.*, **89**, 351 (2003).
- Černý P., Jelínková H., Zverev P.G., Basiev T.T. *Prog. Quantum Electron.*, **28**, 113 (2004).
- Грэхэм К., Федоров В.В., Милов С.Б., Дорошенко М.Е., Басиев Т.Т., Орловский Ю.В., Осико В.В., Бадиков В.В., Панютин В.Л. *Квантовая электроника*, **34**, 8 (2004).
- Басиев Т.Т., Гаврилов А.В., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **34**, 649 (2004).
- Basiev T.T., Danileiko Yu.K., Doroshenko M.E., Fedin A.V., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N. *Laser Phys.*, **14**, 917 (2004).
- Басиев Т.Т., Зверев П.Г., Карасик А.Я., Осико В.В., Соболев А.А., Чунаев Д.С. *ЖЭТФ*, **126**, 1073 (2004).
- Basiev T.T., Jelínková H., Šulc J., Zverev P.G., Kravtsov S.B. *Laser Phys. Lett.*, **2**, 4 (2005).
- Басиев Т.Т. *ФТТ*, **47**, 1354 (2005).
- Lisinetkii V.A., Rozhok S.V., Bus'ko D.N., Chulkov R.V., Grabtchikov A.S., Orlovich V.A., Basiev T.T., Zverev P.G. *Laser Phys. Lett.*, **2**, 396 (2005).
- Ge W., Zhang H., Wang J., Liu J., Li H., Cheng X., Xu H., Hu X., Jiang M. *J. Cryst. Growth*, **276**, 208 (2005).
- Chen Y.F., Su K.W., Zhang H.J., Wang J.Y., Jiang M.H. *Opt. Lett.*, **30**, 3335 (2005).
- Jia G., Tu C., Brenier A., You Z., Li J., Zhu Z., Wang Y., Wu B. *Appl. Phys. B*, **81**, 627 (2005).
- Basiev T.T., Basieva M.N., Doroshenko M.E., Fedorov V.V., Osiko V.V., Mirov S.B. *Laser Phys. Lett.*, **3**, 17 (2006).
- Ling Z.C., Xia H.R., Ran D.G., Liu F.Q., Sun S.Q., Fan J.D., Zhang H.J., Wang J.Y., Yu L.L. *Chem. Phys. Lett.*, **426**, 85 (2006).
- Басиев Т.Т., Дорошенко М.Е., Ивлева Л.И., Осико В.В., Космына М.Б., Комарь В.К., Шульц Я., Елинкова Х. *Квантовая электроника*, **36**, 720 (2006).
- Басиев Т.Т., Осико В.В. *Успехи химии*, **75**, 939 (2006).
- Basiev T.T., Vodchits A.I., Orlovich V.A. *Opt. Mater.*, **29**, 1616 (2007).
- Doroshenko M.E., Basiev T.T., Vassiliev S.V., Ivleva L.I., Komar V.K., Kosmyna M.B., Jelínková H., Šulc J. *Opt. Mater.*, **30**, 54 (2007).
- Šulc J., Jelínková H., Basiev T.T., Doroshenko M.E., Ivleva L.I., Osiko V.V., Zverev P.G. *Opt. Mater.*, **30**, 195 (2007).
- Piper J.A., Pask H.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 692 (2007).
- Li S., Zhang X., Wang Q., Zhang X., Cong Z., Zhang H., Wang J. *Opt. Lett.*, **32**, 2951 (2007).
- Jia G., Wang H., Lu X., You Z., Li J., Zhu Z., Tu C. *Appl. Phys. B*, **90**, 497 (2008).
- Fan Y.X., Liu Y., Duan Y.H., Wang Q., Fan L., Wang H.T., Jia G.H., Tu C.Y. *Appl. Phys. B*, **93**, 327 (2008).
- Fan L., Fan Y.X., Duan Y.H., Wang Q., Wang H.T., Jia G.H., Tu C.Y. *Appl. Phys. B*, **94**, 553 (2009).
- Басиев Т.Т., Басиева М.Н., Гаврилов А.В., Ершков М.Н., Ивлева Л.И., Осико В.В., Сметанин С.Н., Федин А.В. *Квантовая электроника*, **40**, 710 (2010).
- Lee A.J., Pask H.M., Piper J.A., Zhang H., Wang J. *Opt. Express*, **18**, 5984 (2010).
- Xu H., Zhang X., Wang Q., Wang C., Wang W., Li L., Liu Z., Chong Z., Chen X., Fan S., Zhang H., Tao X. *Appl. Phys. B*, **107**, 343 (2012).
- Басиев Т.Т., Сметанин С.Н., Федин А.В., Шурыгин А.С. *Оптика и спектроскопия*, **107**, 377 (2009).
- Басиев Т.Т., Сметанин С.Н., Шурыгин А.С., Федин А.В. *УФН*, **180**, 639 (2010).
- Шен И.Р. *Принципы нелинейной оптики* (М.: Наука, 1989).
- Jelínek M., Kubeček V. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 657 (2011).
- Carman R.L., Shimizu F., Wang C.S., Bloembergen N. *Phys. Rev. A*, **2**, 60 (1970).
- Зельдович Б.Я., Пилипетский Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
- Сметанин С.Н., Басиев Т.Т. *Квантовая электроника*, **42**, 224 (2012).