

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

PACS 42.65.Dr; 42.65.Lm; 42.70.Mr

## Синхронизм четырехволновых взаимодействий ВКР-компонент в двулучепреломляющих ВКР-кристаллах

С.Н.Сметанин, Т.Т.Басиев

*Предложен новый метод реализации волнового синхронизма четырехволновых взаимодействий частотных компонент излучения при ВКР в двулучепреломляющих ВКР-кристаллах, обеспечивающий генерацию антистоксовых волн и позволяющий существенно снизить пороги генерации высших стоксовых ВКР-компонент излучения. Найдены направления синхронизма в области длин волн 0.4–0.7 мкм для отрицательного одноосного ВКР-кристалла  $BaWO_4$  и положительного одноосного ВКР-кристалла  $SrWO_4$ .*

**Ключевые слова:** вынужденное комбинационное рассеяние, четырехволновое смещение, волновой синхронизм, двулучепреломляющий кристалл.

В настоящее время большой интерес вызывают ВКР-лазеры, обеспечивающие стоксов сдвиг частот лазерного излучения. Использование кристаллических ВКР-сред с высокими характеристиками обеспечивает создание эффективных и компактных ВКР-конвертеров и ВКР-лазеров. Одними из наиболее перспективных ВКР-кристаллов являются вольфраматы ( $BaWO_4$ ,  $SrWO_4$ ,  $KGd(WO_4)_2$  и др.), имеющие высокий коэффициент ВКР-усиления, широкую полосу пропускания (красная граница ~5 мкм) и, кроме того, допускающие легирование активными лазерными ионами [1, 2].

Проблемой для кристаллических ВКР-лазеров является обеспечение эффективной генерации высших ВКР-компонент, а также антистоксовых волн. В первом случае необходимо существенное повышение интенсивности излучения накачки (ограниченной лучевым пробоем кристалла), что связано с уменьшением коэффициента ВКР-усиления при увеличении длин волн стоксовых ВКР-компонент. Во втором случае (антистоксова генерация) необходимо выполнение условия волнового синхронизма четырехволновой связи ВКР-компонент излучения, чему препятствует большая дисперсия показателя преломления кристаллических сред.

При выполнении условия волнового синхронизма параметрическое четырехволновое смещение (ЧВС) обеспечивает генерацию антистоксовых волн при ВКР, а также позволяет существенно снизить пороги генерации высших стоксовых ВКР-компонент [3,4]. В нелинейной оптике сред с квадратичной нелинейностью [5] условие волнового синхронизма нелинейных взаимодействий точно выполняется в определенном направлении внутри двулучепреломляющего кристалла при взаимодействии ортогонально поляризованных волн. В настоящей работе мы предлагаем распространить этот метод на нелинейные

процессы четырехволновых взаимодействий ортогонально поляризованных ВКР-компонент излучения в двулучепреломляющих активных ВКР-кристаллах с кубичной нелинейностью.

Как показано в [4], вклад параметрической связи в ВКР зависит от выполнения условия волнового синхронизма. В случае частично вырожденного ЧВС (ЧВЧВС) для каждых трех соседних ВКР-компонент излучения имеем условие

$$2k_j = k_{j-1} + k_{j+1}. \quad (1)$$

В случае невырожденного ЧВС (НВЧВС) для каждых четырех соседних ВКР-компонент излучения аналогичное условие имеет вид

$$k_j + k_{j+1} = k_{j-1} + k_{j+2}. \quad (2)$$

Здесь  $j$  – номер ВКР-компоненты излучения, являющейся волной ЧВС-накачки ( $j = 0$  – волна ВКР-накачки,  $j < 0$  – антистоксова волна,  $j > 0$  – стоксова волна);  $j-1, j+1, j+2$  – номера соседних ВКР-компонент излучения, участвующих в процессе ЧВС при ЧВС-накачке  $j$ -й волной;  $k_j, k_{j-1}, k_{j+1}$  и  $k_{j+2}$  – волновые векторы данных ВКР-компонент излучения.

Наличие дисперсии показателя преломления среды приводит к волновой расстройке процесса ЧВЧВС

$$\begin{aligned} \Delta k_j &= k_{j-1} + k_{j+1} - 2k_j \\ &= (n_{j-1} + n_{j+1} - 2n_j)2\pi\lambda_j^{-1} + (n_{j-1} - n_{j+1})2\pi\nu_R \end{aligned} \quad (3)$$

и волновой расстройке процесса НВЧВС

$$\begin{aligned} \Delta K_j &= k_{j-1} + k_{j+2} - k_j - k_{j+1} = (n_{j-1} + n_{j+2} \\ &- n_j - n_{j+1})2\pi\lambda_j^{-1} + (n_{j-1} + n_{j+1} - 2n_{j+2})2\pi\nu_R, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $n_j, n_{j-1}, n_{j+1}$  и  $n_{j+2}$  – показатели преломления для соответствующих волн;  $\lambda_j$  – длина волны ЧВС-накачки;  $\nu_R$  – комбинационный сдвиг частоты, измеряемый в обратных

С.Н.Сметанин, Т.Т.Басиев. Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: ssmetanin@bk.ru

Поступила в редакцию 8 декабря 2011 г, после доработки – 25 января 2012 г.

сантиметрах. Это нарушает условия (1) и (2) в случае коллинеарной генерации ВКР-компонент излучения и ослабляет их параметрическую связь.

Отметим, что в процессах ЧВС, идущих в антистоксовую область, волной ЧВС-накачки является волна на исходной частоте (длина волны  $\lambda_0$ ), а в процессах, идущих в стоксову область, – первая стоксова ВКР-компонента излучения с длиной волны  $\lambda_1 = (\lambda_0^1 - \nu_R)^{-1}$ .

В настоящей работе мы ищем условия, при которых волновая расстройка (3) или (4) равна нулю, т. е. осуществляется точный волновой синхронизм ЧВС при ВКР. При этом нас интересует выполнение условия синхронизма при любой длине волны ВКР-накачки, а не только равной длине волны, соответствующей нулевой дисперсии [4]. Поэтому мы предлагаем осуществить синхронизм ЧВС в определенном направлении для ортогонально поляризованных волн, что подобно обеспечению синхронизма трехволновых взаимодействий в нелинейной оптике сред с квадратичной нелинейностью.

Известно [4,6], что стационарная модель, описывающая коллинеарный процесс ВКР с частично вырожденной четырехволновой связью ВКР-компонент излучения, представляет собой систему уравнений для волны ВКР-накачки ( $E_0$ ), антистоксовой ( $E_{-1}$ ) и стоксовой ( $E_1$ ) волн:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{-1}}{dz} &= -\frac{g}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda_{-1}} |E_0|^2 E_{-1} - \frac{g}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda_{-1}} E_0^2 E_{-1}^* \exp(i\Delta k_0 z), \\ \frac{dE_0}{dz} &= -\frac{g}{2} \frac{\lambda_1}{\lambda_0} |E_1|^2 E_0 + \frac{g}{2} |E_{-1}|^2 E_0, \\ \frac{dE_1}{dz} &= \frac{g}{2} |E_0|^2 E_1 + \frac{g}{2} E_0^2 E_{-1}^* \exp(i\Delta k_0 z), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $g$  – коэффициент ВКР-усиления среды. Первые слагаемые второго и третьего уравнений описывают ВКР-преобразование волны накачки в стоксову волну, что может происходить без участия ЧВС и не требует выполнения условия синхронизма. Поэтому обычно стоксова волна приобретает поляризацию волны накачки. Вторые слагаемые первого и последнего уравнений описывают ЧВЧВС-связь стоксовой и антистоксовой волн, посредством которой может генерироваться антистоксова волна, но это происходит только при  $\Delta k_0 \rightarrow 0$ . Если поляризация антистоксовой волны будет ортогональна поляризациям стоксовой волны и волны накачки, то для некоторого направления в двулучепреломляющем кристалле мы можем реализовать  $\Delta k_0 = 0$  и осуществить эффективную коллинеарную ЧВС-генерацию антистоксовой волны. Если в системе уравнений (5) увеличить цифровые индексы на единицу, то мы получим систему уравнений для ЧВЧВС при генерации второй стоксовой волны. И опять же, для поляризации второй стоксовой волны, ортогональной поляризациям волн накачки и первого стока, мы можем реализовать  $\Delta k_1 = 0$  для определенного направления в кристалле и снизить пороги генерации высших стоксовых компонент. Аналогичные рассуждения будут справедливы и для НВЧВС.

Таким образом, далее мы полагаем, что направление поляризации стоксовой волны совпадает с таковым для волны ВКР-накачки, а ортогонально поляризованной будет волна, генерируемая при ЧВС (антистоксова либо высшая стоксова компонента).

В качестве двулучепреломляющих ВКР-кристаллов мы предлагаем использовать вольфраматы, характерными

представителями которых являются одноосный отрицательный кристалл  $\text{BaWO}_4$  и одноосный положительный кристалл  $\text{SrWO}_4$ .

Пусть ВКР-кристаллы ориентированы под углом  $\Theta$  к оптической оси. При переходе от направления распространения света, параллельного оптической оси (направление, соответствующее  $\Theta = 0$ ), к ортогональному направлению ( $\Theta = 90^\circ$ ) мы получаем изменение показателя преломления для необыкновенной волны от  $n_o$  до  $n_e$  ( $n_o$  и  $n_e$  – главные значения показателей преломления одноосного кристалла [5]). Угол  $\Theta$  рассчитывается из условия равенства нулю волновой расстройки процесса ЧВЧВС  $\Delta k_j$  (3) или процесса НВЧВС  $\Delta K_j$  (4).

Показатель преломления для необыкновенной волны, распространяющейся под углом  $\Theta$ , находится следующим образом [5]:

$$n^e(\Theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 - (n_o^2 - n_e^2) \cos^2 \Theta}}. \quad (6)$$

Показатель преломления для обыкновенной волны  $n^o$ , распространяющейся под углом  $\Theta$ , не зависит от  $\Theta$  и равен  $n_o$ .

Теперь можно записать выражения для волновых расстроек процессов ЧВС при ВКР в случае ортогональной поляризации волн, генерируемых при ЧВС. Выражения для волновой расстройки ЧВЧВС при ВКР, исходя из (3) и с учетом (6), в зависимости от угла  $\Theta$  запишутся в виде

$$\begin{aligned} \Delta k_j^{\text{ооо}}(\Theta) &= [n_{j-1}^e(\Theta) + n_{j+1}^o - 2n_j^o] 2\pi \lambda_j^{-1} \\ &+ [n_{j-1}^e(\Theta) - n_{j+1}^o] 2\pi \nu_R, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta k_j^{\text{оо}}(\Theta) &= [n_{j-1}^o + n_{j+1}^e(\Theta) - 2n_j^e(\Theta)] 2\pi \lambda_j^{-1} \\ &+ [n_{j-1}^o - n_{j+1}^e(\Theta)] 2\pi \nu_R. \end{aligned}$$

Выражения для волновой расстройки НВЧВС при ВКР, исходя из (4) и с учетом (6), в зависимости от угла  $\Theta$  запишутся в виде

$$\begin{aligned} \Delta K_j^{\text{оооо}}(\Theta) &= [n_{j-1}^e(\Theta) + n_{j+2}^o - n_j^o - n_{j+1}^o] 2\pi \lambda_j^{-1} \\ &+ [n_{j-1}^e(\Theta) + n_{j+1}^o - 2n_{j+2}^o] 2\pi \nu_R, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta K_j^{\text{ооо}}(\Theta) &= [n_{j-1}^o + n_{j+2}^e(\Theta) - n_j^e(\Theta) - n_{j+1}^e(\Theta)] 2\pi \lambda_j^{-1} \\ &+ [n_{j-1}^o + n_{j+1}^e(\Theta) - 2n_{j+2}^e(\Theta)] 2\pi \nu_R. \end{aligned}$$

Комбинационный сдвиг частоты  $\nu_R$  для кристалла  $\text{BaWO}_4$  равен  $926 \text{ см}^{-1}$  [7]. Формулы Селлмейера, описывающие дисперсионные кривые для кристалла  $\text{BaWO}_4$ , в области  $\lambda = 0.4 - 0.7 \text{ мкм}$  имеют вид [8]

$$n_o^2 = 3.3550 + \frac{0.01738}{\lambda^2 - 0.08176} - 0.0965 \lambda^2, \quad (9)$$

$$n_e^2 = 3.3460 + \frac{0.0177}{\lambda^2 - 0.08197} - 0.0962 \lambda^2.$$

На рис.1 представлены зависимости расстроек  $\Delta k_0^{\text{ооо}}$  и  $\Delta k_0^{\text{оо}}$  волнового синхронизма при антистоксовом ЧВЧВС, рассчитанные по формулам (7) при  $j = 0$ , и расстроек  $\Delta K_0^{\text{оооо}}$  и  $\Delta K_0^{\text{ооо}}$  при антистоксовом НВЧВС, рассчитан-

ные по формулам (8) при  $j = 0$ , от длины волны ВКР-накачки  $\lambda_0$  при указанных углах  $\Theta$  ориентации кристалла  $\text{BaWO}_4$ .

Из рис.1 видно, что даже при ориентации кристалла  $\text{BaWO}_4$ , соответствующей  $\Theta = 90^\circ$ , существуют длины волн ВКР-накачки, при которых волновая расстройка процессов ЧВС равна нулю. При этом наблюдаются точный синхронизм ЧВЧВС типа ооо для  $\lambda_0 = 0.4371$  мкм и точный синхронизм НВЧВС типа оооо для  $\lambda_0 = 0.4807$  мкм. Отметим, что длину волны  $\lambda_0 = 0.48$  мкм (голубой свет) имеет аргоновый лазер накачки, при этом антистоксово НВЧВС при ВКР в кристалле  $\text{BaWO}_4$  обеспечит генерацию антистоксовой волны с длиной  $\lambda_{-1} = (\lambda_0^{-1} + \nu_R)^{-1} = 0.460$  мкм (синий свет).

Уменьшение угла  $\Theta$  приводит к увеличению длины волны ВКР-накачки, для которой выполняется условие синхронизма ЧВС при ВКР. При уменьшении угла  $\Theta$  до  $53.23^\circ$  наблюдается точный синхронизм антистоксова НВЧВС типа оооо для длины волны второй гармоники широко используемого YAG:Nd-лазера  $\lambda_0 = 0.532$  мкм (рис.1,б). При  $\Theta = 36.35^\circ$  наблюдается точный синхронизм антистоксова ЧВЧВС типа ооо (рис.1,а) для той же длины волны  $\lambda_0 = 0.532$  мкм. Наконец, для длины волны  $\lambda_0 = 0.7$  мкм (красная граница диапазона, в котором изме-

рены значения показателя преломления) имеем синхронизм антистоксовых процессов НВЧВС и ЧВЧВС соответственно при  $\Theta = 30^\circ$  (рис.1,б) и  $22.27^\circ$  (рис.1,а).

Отметим, что условие волнового синхронизма в кристалле  $\text{BaWO}_4$  выполняется для необыкновенной антистоксовой волны (генерируемой при ЧВС). Остальные ВКР-компоненты излучения, участвующие в данном процессе ЧВС, должны быть обыкновенными волнами.

Аналогично, исходя из дисперсионных зависимостей (9), строятся зависимости волновых расстроек  $\Delta k_1$  и  $\Delta K_1$  для ЧВЧВС-генерации второго стокса и НВЧВС-генерации третьего стокса соответственно. В результате в случае  $\Theta = 90^\circ$  имеем  $\Delta k_1^{\text{ооо}} = 0$  (ЧВЧВС-генерация второго стокса) и  $\Delta K_1^{\text{оооо}} = 0$  (НВЧВС-генерация третьего стокса) при  $\lambda_0 = 0.4138$  и  $0.4539$  мкм соответственно.

Для выполнения условия волнового синхронизма стоксова ЧВС при ВКР на длине волны накачки  $\lambda_0 = 0.532$  мкм необходимо уменьшить угол ориентации  $\Theta$  до  $45.27^\circ$  для НВЧВС-генерации третьего стокса ( $\Delta K_1^{\text{оооо}} = 0$ ) или до  $33.59^\circ$  для ЧВЧВС-генерации второго стокса ( $\Delta k_1^{\text{ооо}} = 0$ ). Для максимальной длины волны  $\lambda_0 = 0.7$  мкм получим синхронизм ЧВЧВС-генерации второго стокса при  $\Theta = 20.68^\circ$  и синхронизм НВЧВС-генерации третьего стокса при  $\Theta = 19.44^\circ$ .

Таким образом, как и в случае антистоксова ЧВС, для выполнения условия синхронизма стоксова ЧВС необходимо, чтобы генерируемая при ЧВС волна (второй или третий стокс) была необыкновенной, а остальные ВКР-компоненты излучения, участвующие в данном процессе ЧВС, были обыкновенными волнами.

Комбинационный сдвиг частоты  $\nu_R$  для кристалла  $\text{SrWO}_4$  равен  $921.5 \text{ см}^{-1}$  [7]. Формулы Селлмейера, описывающие дисперсионные кривые для кристалла  $\text{SrWO}_4$ , в области  $\lambda_0 = 0.4\text{--}0.7$  мкм имеют вид [8]

$$n_o^2 = 3.3219 + \frac{0.04538}{\lambda^2 - 0.007226} + 0.0257\lambda^2, \tag{10}$$

$$n_e^2 = 3.3490 + \frac{0.04825}{\lambda^2 - 0.0090808} - 0.03085\lambda^2.$$

На рис.2 представлены зависимости расстроек  $\Delta k_0^{\text{ооо}} \text{ и } \Delta k_0^{\text{оооо}}$  волнового синхронизма при антистоксовом ЧВЧВС, рассчитанные по формулам (7), и расстроек  $\Delta K_0^{\text{оооо}} \text{ и } \Delta K_0^{\text{еосо}}$  при антистоксовом НВЧВС, рассчитанные по формулам (8), от длины волны ВКР-накачки  $\lambda_0$  при указанных углах  $\Theta$  ориентации кристалла  $\text{SrWO}_4$ .

Необходимо отметить, что кристалл  $\text{SrWO}_4$  имеет на порядок большее двулучепреломление ( $n_e - n_o \approx 0.01$  согласно (10)), чем кристалл  $\text{BaWO}_4$  ( $n_o - n_e \approx 0.002$  согласно (9)). Это приводит к тому, что при  $\Theta = 90^\circ$  для ВКР-кристалла  $\text{SrWO}_4$  волновой синхронизм ЧВС отсутствует. Только при существенном уменьшении угла  $\Theta$ , когда показатель преломления  $n^e(\Theta)$  приближается к  $n_o$ , возникает возможность выполнения условия синхронизма ЧВС. На рис.2 показаны зависимости волновых расстроек при углах ориентации  $\Theta = 12.85^\circ$  (рис.2,а) и  $18.17^\circ$  (рис.2,б), отвечающих выполнению условия синхронизма антистоксовых процессов ЧВЧВС и НВЧВС соответственно для длины волны ВКР-накачки  $\lambda_0 = 0.4$  мкм.

Заметим, что в отличие от рис.1 (для отрицательного одноосного кристалла  $\text{BaWO}_4$ ), где наблюдается синхронизм ооо- и оооо-типов, на рис.2 (для положительного одноосного кристалла  $\text{SrWO}_4$ ) выполняется условие вол-

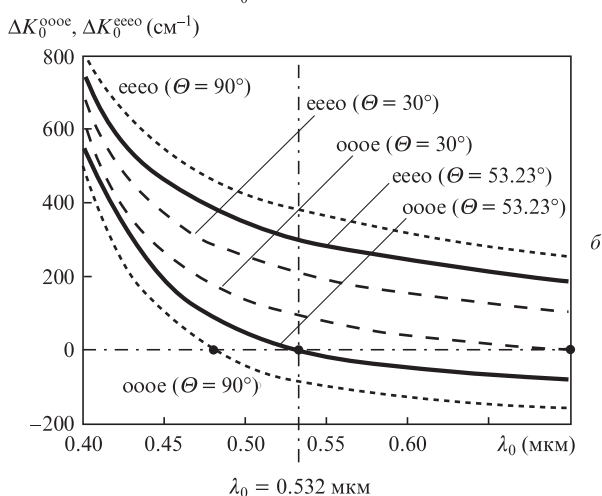
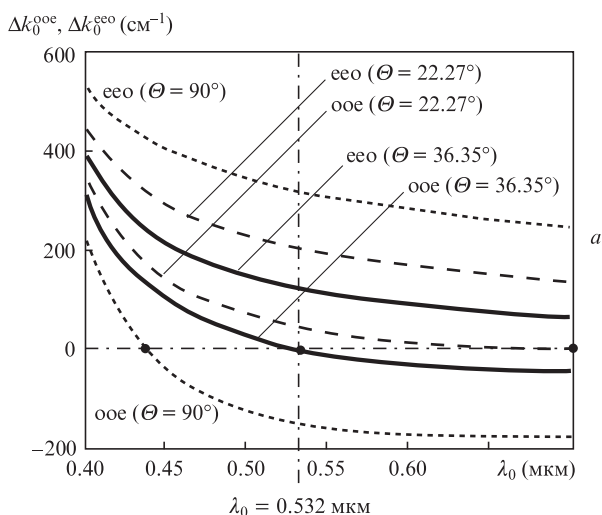


Рис.1. Зависимости расстроек  $\Delta k_0^{\text{ооо}}$  и  $\Delta k_0^{\text{оооо}}$  волнового синхронизма при антистоксовом ЧВЧВС (а) и расстроек  $\Delta K_0^{\text{оооо}}$  и  $\Delta K_0^{\text{еосо}}$  при антистоксовом НВЧВС (б) от длины волны ВКР-накачки  $\lambda_0$  при указанных углах  $\Theta$  ориентации кристалла  $\text{BaWO}_4$ .

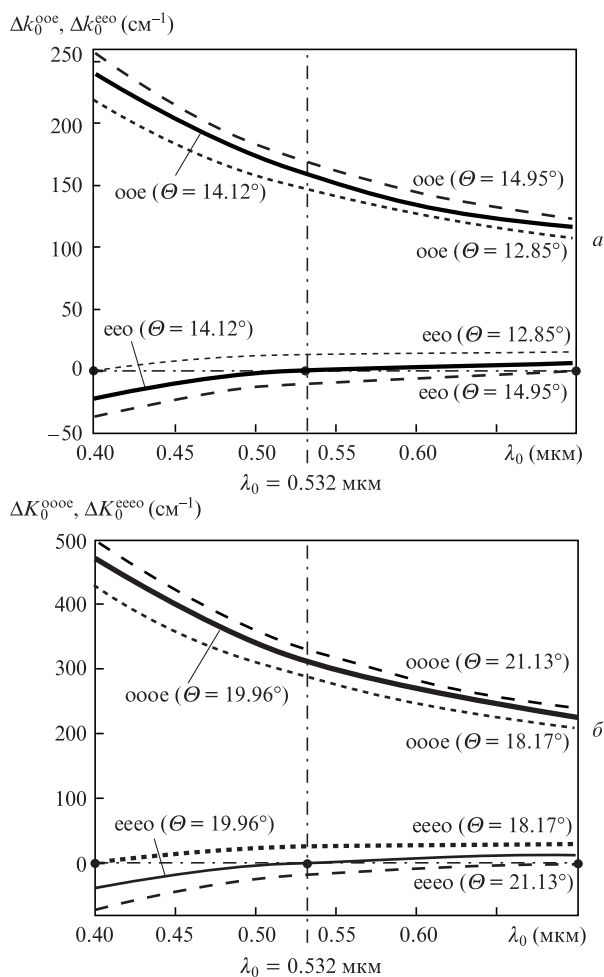


Рис.2. Зависимости расстройк  $\Delta k_0^{ooe}$  и  $\Delta k_0^{eeo}$  волнового синхронизма при антистоксовом ЧВЧВС (а) и расстройк  $\Delta K_0^{oooo}$  и  $\Delta K_0^{eeee}$  при антистоксовом НВЧВС (б) от длины волны ВКР-накачки  $\lambda_0$  при указанных углах  $\Theta$  ориентации кристалла  $\text{SrWO}_4$ .

нового синхронизма еео- и ееео-типов, что является следствием неравенства  $n^e(\Theta) > n_o$ . Уменьшение угла ориентации  $\Theta$ , как и в предыдущем случае, приводит к увеличению длины волны  $\lambda_0$  ВКР-накачки, соответствующей синхронизму ЧВС. Для  $\lambda_0 = 0.532$  мкм имеем синхронизм антистоксовой ЧВЧВС-генерации при  $\Theta = 14.12^\circ$  (рис.2,а), а также синхронизм антистоксовой НВЧВС-генерации при  $\Theta = 19.96^\circ$  (рис.2,б). Для  $\lambda_0 = 0.7$  мкм получаем углы синхронизма  $\Theta = 14.95^\circ$  и  $21.13^\circ$  для антистоксовых ЧВЧВС-генерации и НВЧВС-генерации соответственно.

Аналогичные расчеты условия выполнения волнового синхронизма стоксова ЧВС при ВКР в кристалле  $\text{SrWO}_4$  по формулам (9) и (10) для длины волны ВКР-накачки  $\lambda_0 = 0.4$  мкм дают углы синхронизма  $\Theta = 14.07^\circ$  и  $19.85^\circ$  для ЧВЧВС-генерации второго стокса и НВЧВС-генерации третьего стокса соответственно. На длине волны  $\lambda_0 = 0.532$  мкм получим синхронизм при  $\Theta = 15.46^\circ$  и  $21.98^\circ$  для ЧВЧВС-генерации второго стокса и НВЧВС-генера-

ции третьего стокса соответственно. И при  $\lambda_0 = 0.7$  мкм имеем  $\Theta = 16.44^\circ$  и  $23.63^\circ$  соответственно для ЧВЧВС-генерации второго стокса и НВЧВС-генерации третьего стокса.

Необходимо отметить, что условие синхронизма ЧВС при ВКР в кристалле  $\text{SrWO}_4$  с большим двулучепреломлением выполняется в более широком диапазоне длин волн, чем в кристалле  $\text{BaWO}_4$  с малым двулучепреломлением. При этом углы ориентации кристалла  $\text{SrWO}_4$  изменяются относительно мало, т.е. синхронизм ЧВС при ВКР в нем оказывается не критичным. Это позволяет использовать для частотного преобразования широкополосное лазерное излучение и сверхкороткие лазерные импульсы, а также применять один и тот же активный ВКР-элемент при накачке разными лазерами.

Таким образом, предложен новый метод реализации волнового синхронизма четырехволновых взаимодействий частотных компонент излучения при ВКР в двулучепреломляющих ВКР-кристаллах, обеспечивающий генерацию антистоксовых волн и позволяющий существенно снизить пороги генерации высших стоксовых ВКР-компонент излучения.

На примере наиболее перспективных ВКР-кристаллов вольфрамовых показано, что условие волнового синхронизма частично вырожденного и невырожденного четырехволнового смещения ВКР-компонент излучения точно выполняется в определенном направлении внутри двулучепреломляющего кристалла при взаимодействии ортогонально поляризованных волн. При этом ортогонально поляризованной к остальным ВКР-компонентам излучения может быть антистоксова или высшая стоксова компонента, генерируемая путем ЧВС при ВКР.

По известным дисперсионным кривым в области 0.4–0.7 мкм найдены направления синхронизма для отрицательного одноосного ВКР-кристалла  $\text{BaWO}_4$  и положительного одноосного ВКР-кристалла  $\text{SrWO}_4$ . Отметим, что расчеты, проведенные в приближении плоских волн, интересны для практической реализации рассматриваемого эффекта при внутрирезонаторном ВКР, когда не требуется фокусировки лазерного излучения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-01179).

1. Basiev T.T., Powell R.C., in *Handbook of Laser Technology and Applications* (Bristol – Philadelphia: Institute of Physics Publ., 2004).
2. Басиев Т.Т., Осико В.В. *Успехи химии*, **75**, 939 (2006).
3. Бломберген Н. *УФН*, **97**, 307 (1969).
4. Басиев Т.Т., Сметанин С.Н., Шурыгин А.С., Федин А.В. *УФН*, **180**, 639 (2010).
5. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004).
6. Shen Y.R., Bloembergen N. *Phys. Rev. A*, **137**, 1787 (1965).
7. 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).
8. Voronina I.S., Ivleva L.I., Basiev T.T., Zverev P.G., Polozkov N.M. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **5**, 887 (2003).