

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; λ_j – длина волны ЧВС-накачки; ν_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 антистоксову область, волной ЧВС-накачки является волна на исходной частоте (длина волны λ_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 BaWO_4 и одноосный положительный кристалл SrWO_4 .

Пусть ВКР-кристаллы ориентированы под углом Θ 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 Θ рассчитывается из условия равенства нулю волновой расстройки процесса ЧВЧВС Δk_j (3) или процесса НВЧВС ΔK_j (4).

Показатель преломления для необыкновенной волны, распространяющейся под углом Θ , 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 Θ , не зависит от Θ 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 Θ запишутся в виде

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

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

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

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

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

Комбинационный сдвиг частоты ν_R для кристалла BaWO_4 равен 926 см^{-1} [7]. Формулы Селлмейера, описывающие дисперсионные кривые для кристалла 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 Δk_0^{ooe} и Δk_0^{eoo} волнового синхронизма при антистоксовом ЧВЧВС, рассчитанные по формулам (7) при $j = 0$, и расстроек ΔK_0^{oooe} и ΔK_0^{eooo} при антистоксовом НВЧВС, рассчитан-

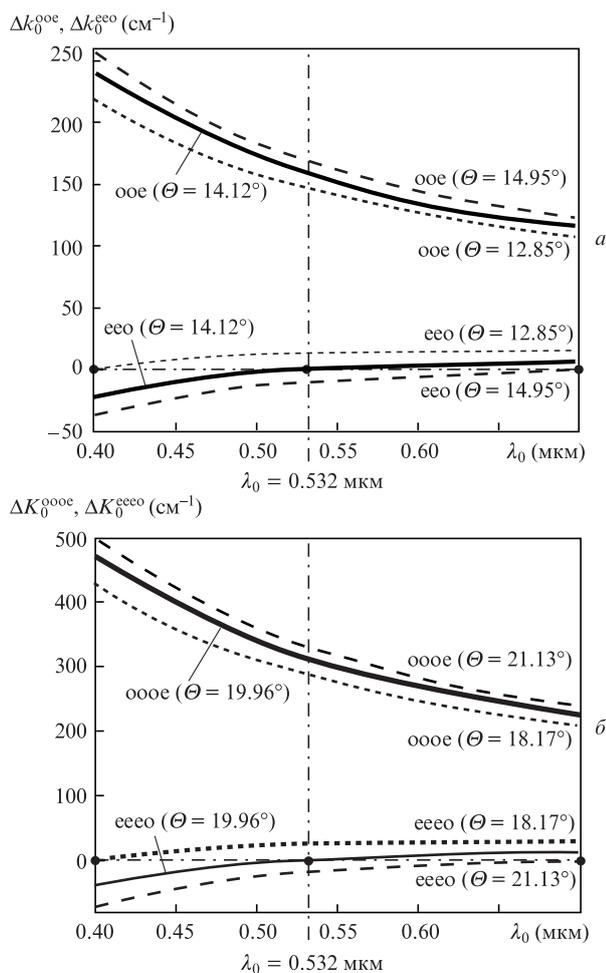


Рис.2. Зависимости расстройк Δk_0^{ooe} и Δk_0^{eeo} волнового синхронизма при антистоксовом ЧВЧВС (а) и расстройк ΔK_0^{oooo} и ΔK_0^{eeee} при антистоксовом НВЧВС (б) от длины волны ВКР-накачки λ_0 при указанных углах Θ ориентации кристалла SrWO_4 .

нового синхронизма еео- и ееео-типов, что является следствием неравенства $n^e(\Theta) > n_o$. Уменьшение угла ориентации Θ , как и в предыдущем случае, приводит к увеличению длины волны λ_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° для антистоксовых ЧВЧВС-генерации и НВЧВС-генерации соответственно.

Аналогичные расчеты условия выполнения волнового синхронизма стоксова ЧВС при ВКР в кристалле 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° 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° 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° соответственно для ЧВЧВС-генерации второго стокса и НВЧВС-генерации третьего стокса.

Необходимо отметить, что условие синхронизма ЧВС при ВКР в кристалле SrWO_4 с большим двулучепреломлением выполняется в более широком диапазоне длин волн, чем в кристалле BaWO_4 с малым двулучепреломлением. При этом углы ориентации кристалла 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 вольфраматов 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 BaWO_4 и положительного одноосного ВКР-кристалла 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).