

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ****Функциональные возможности нелинейных кристаллов для преобразования частоты: одноосные кристаллы****Ю.М.Андреев, Ю.Д.Арапов, С.Г.Гречин, И.В.Касьянов, П.П.Николаев**

*Представлены методика и результаты анализа фазосинхронных и нелинейных свойств одноосных кристаллов всех точечных групп симметрии, которые определяют функциональные возможности этих кристаллов для решения различных задач нелинейно-оптического преобразования частоты лазерного излучения.*

**Ключевые слова:** нелинейно-оптические кристаллы, преобразование частоты, одноосные кристаллы.

Год от года возрастают потребности в источниках лазерного излучения с самыми различными длинами волн для всевозможных практических применений. Это относится к таким задачам, как лазерная фотохимия, нелинейное возбуждение атомов и молекул, лазерная фотокинетика, экологический мониторинг, фотобиология, спектроскопия, разделение изотопов и др. [1–3]. Для большинства из этих задач излучение формируется при преобразовании частоты за счет генерации гармоник, генерации суммарных и разностных частот (ГСЧ и ГРЧ) либо при параметрическом преобразовании. Первым шагом сравнительного анализа кристаллов для решения указанных задач является определение их фазосинхронных и нелинейных свойств в заданном диапазоне длин волн как необходимых и достаточных условий процесса преобразования частоты. Новые прикладные задачи в большинстве своем требуют повторения всех этих процедур, т. к. диапазоны длин волн, в пределах которых имеет место фазовый синхронизм и реализуется максимальный коэффициент нелинейной восприимчивости для всех процессов преобразования частоты, в общем виде не определены.

Приводимые в справочнике [4] некоторые данные на различных длинах волн по генерации гармоник, ГСЧ и ГРЧ, а также по диапазону перестройки по длине волны параметрических генераторов света не позволяют определить все потенциальные возможности используемых кристаллов. Одновременно с этим традиционно стоит вопрос об определении функциональных возможностей но-

вых синтезируемых кристаллов. Первые пробные эксперименты, которые выполняются при преобразовании частоты на некоторых фиксированных длинах волн, дают ответ на вопрос только о факте реализации фазового синхронизма и о значении коэффициента эффективной нелинейности, но не о всех возможностях новых кристаллов для различных процессов.

В связи с этим необходимо представить в наиболее общем виде информацию, определяющую функциональные возможности нелинейных кристаллов для ГСЧ и ГРЧ в диапазоне их прозрачности. В первую очередь определяются диапазон длин волн, в пределах которого реализуется фазовый синхронизм, и максимальный коэффициент эффективной нелинейности  $FOM_1 = d_{\text{eff}}$  (figure-of-merit – показатель качества), т. е. необходимые и достаточные условия процесса преобразования частоты. На практике обычно используется не  $FOM_1$ , а более информативный параметр  $FOM_2 = d_{\text{eff}}^2/n^3$  ( $n$  – показатель преломления) [5], характеризующий процесс преобразования частоты по интенсивности. Результаты для  $FOM_2$  можно представить в виде двухпараметрической зависимости  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2) = d_{\text{eff}}^2(d_{ijk}, \theta_{\text{phm}}(\lambda_1, \lambda_2), \varphi_{\text{opt}})/n^3(\lambda_3)$  ( $d_{ijk}$  – коэффициенты тензора нелинейной восприимчивости), рассчитываемой в направлении, определяемом углом фазового синхронизма  $\theta_{\text{phm}}$  (в случае одноосных кристаллов при оптимальном значении полярного угла  $\varphi_{\text{opt}}$ ), для длин волн падающего излучения  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , которые совместно с длиной волны  $\lambda_3$  формируемой волны связаны неравенством  $\lambda_1 \geq \lambda_2 > \lambda_3$ . Такие зависимости приводятся для всех возможных типов взаимодействия (ооо, оое, еое для отрицательных кристаллов и еео, еоо, оео для положительных).

Типичные распределения  $FOM_2 = f(\lambda_1, \lambda_2)$  для отрицательного кристалла КДР точечной группы 42m приведены на рис.1\*. Сплошными кривыми показаны изолинии длин волн  $\lambda_3$ , которые получаются для заданной комбинации  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Здесь и далее за пределами области существования фазового синхронизма поле представлено белым цветом для большей наглядности. В силу определенного выше соотношения для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  распределение представлено ниже линии  $\lambda_1 = \lambda_2$ , соответствующей генерации второй гармоники (ГВГ). В традиционной

**Ю.М.Андреев.** Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 10/3; Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета, Россия, 634050 Томск, пл. Новособорная, 1

**Ю.Д.Арапов, И.В.Касьянов.** ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И.Забабихина», Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13, а/я 245

**С.Г.Гречин, П.П.Николаев.** Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Россия, 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1; Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, Россия, Новгородская обл., 173003 Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41; e-mail: gera@bmstu.ru

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г., после доработки – 19 ноября 2015 г.

\* Все распределения (рис.1, 3, 5 и табл.2) в цветном варианте приведены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

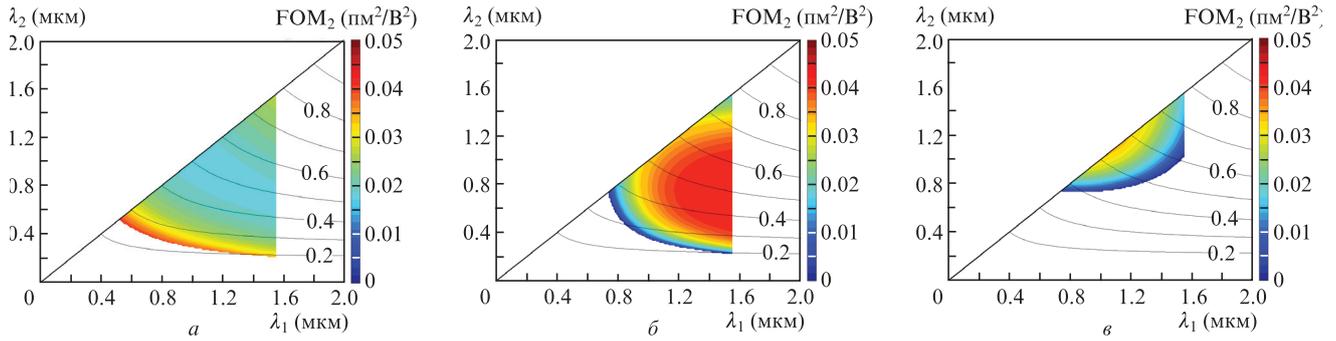


Рис.1. Распределения коэффициента эффективной нелинейности кристалла KDP для оое- (а), еое- (б) и оее-типов (в) взаимодействия. Цифры на кривых – значения  $\lambda_3$  в мкм.

форме дисперсионные зависимости  $\theta_{\text{phm}}$  и  $d_{\text{eff}}$  для двух типов взаимодействия в кристалле KDP приведены на рис.2. Характер этих зависимостей согласуется с данными рис.1.

Можно выделить несколько общих закономерностей распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$ , максимальные значения которого ( $FOM_{2\text{max}}$ ) определяют области эффективного преобразования частоты. Как в УФ, так и в ИК диапазоне рабочая область для задач преобразования частоты ограничена или полосой прозрачности кристалла (что имеет место в большинстве случаев), или наличием фазового синхронизма. Условие фазового синхронизма по длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  всегда сначала выполняется для оое(еое)-типа взаимодействия. Для него диапазон длин волн, в пределах которого реализуется ГВГ, наибольший. Если выполняется условие синхронизма этого типа, то следующим потенциально возможным (но не обязательно реализуемым) является тип взаимодействия еое (оео), а последним – оее (еоо). В области ГСЧ при максимальном  $\lambda_1$  и минимальном  $\lambda_2$  границы распределений  $FOM_2$  очень близки (например, как это имеет место на рис.1,а и б). Однако при такой близости частотный диапазон по  $\lambda_3$  для оое-типа взаимодействия шире, чем для еое- и оее-типов.

При ГВГ ( $\lambda_1 = \lambda_2$ ) диапазоны длин волн фазового синхронизма для еое- и оее-типов взаимодействия совпадают, но при произвольных значениях  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  распределения  $FOM_2$ , как правило, значительно различаются для

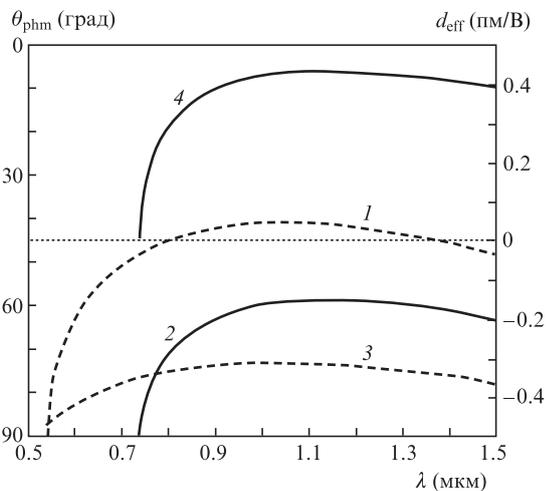


Рис.2. Дисперсионные зависимости  $\theta_{\text{phm}}$  (1,2) и  $d_{\text{eff}}$  (3,4) в случае кристалла KDP при ГВГ для оое- (1,3) и оее-типов (2,4) взаимодействия.

этих двух типов. Характер изменения распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  определяется зависимостью  $d_{\text{eff}}(\theta)$  и угла синхронизма  $\theta_{\text{phm}}$  от длины волны. Для оое- и еое-типов угловые распределения  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  одинаковы, но дисперсионная зависимость  $\theta_{\text{phm}}$  приводит к значительному различию распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  (рис.1,б и в).

В предлагаемой форме представления  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  наглядно видно, что, например, в частном случае кристалла KDP (рис.1) для оое-типа взаимодействия можно получить на краях распределения ( $FOM_2 > 0$ ) как ГВГ при  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.52$  мкм (формирование излучения с  $\lambda_3 = 0.26$  мкм), так и ГСЧ на краю диапазона прозрачности ( $\lambda_1 = 1.55$  мкм,  $\lambda_2 = 0.22$  мкм,  $\lambda_3 = 0.19$  мкм), для еое-типа – ГСЧ при  $\lambda_1 = 1.55$  мкм и  $\lambda_2 = 0.6–0.9$  мкм ( $\lambda_3 = 0.45–0.55$  мкм), а для оее-типа – ГВГ в диапазоне 1.0–1.2 мкм ( $\lambda_3 = 0.5–0.6$  мкм). Наименьшую величину  $\lambda_3$  в большинстве случаев можно получить не в режиме ГВГ, а при ГСЧ. Для кристалла KDP это имеет место для оое- и еое-типов взаимодействия (рис.1). Наибольшую величину  $FOM_2$  можно получить на краю области преобразования частоты для взаимодействия оое-типа (рис.1,а), на границе диапазона прозрачности (рис.1,б) или при ГВГ (рис.1,в).

Очевидно, что характер распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$ , помимо дисперсионной зависимости показателей преломления, определяется также точечной группой симметрии. Для всех кристаллов одной группы, как правило, распределения  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  близки. В наибольшей степени это проявляется для кристалла KDP (точечная группа  $42m$ ) и изоморфных ему. Некоторые количественные различия обусловлены дисперсионной зависимостью  $\theta_{\text{phm}}$ . Имеются исключения, о которых говорится ниже.

В настоящее время используются 40 одноосных нелинейных кристаллов 11 точечных групп симметрии. В табл.1 приведены некоторые из этих кристаллов. Для справки: пространственные распределения коэффициентов эффективной нелинейности 10 точечных групп кристаллов приведены в табл.2. Аналогичные распределения для различных кристаллов одной точечной группы не приводятся. Исключения составляют, например, кристаллы ВВО и LiNbO<sub>3</sub> точечной группы 3m, для которых значения коэффициентов тензора нелинейной восприимчивости сильно различаются. Например, для кристалла ВВО отношение  $d_{22}/d_{31}$  коэффициентов  $d_{22}$  и  $d_{31}$ , определяющих величину коэффициента эффективной нелинейности, равно 47.2–57.5, а для кристалла LiNbO<sub>3</sub> оно составляет 0.48–0.53 [4]. Это различие наиболее сильно проявляется для оое-типа взаимодействия, но распределения для еое- и оее-типов практически одинаковы, т. к. в

Табл.1. Одноосные кристаллы.

Точечная группа	Кристалл
$\bar{4}$	HGS ( $\text{HgGa}_2\text{S}_4$ )
4mm	LB4 ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), Klin ( $\text{K}_3\text{Li}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ )
	ADA ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{AsO}_4$ ), ADP ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), AGS ( $\text{AgGaS}_2$ ), AGSe ( $\text{AgGaSe}_2$ ), $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , CDA ( $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ ), CdGeAs <sub>2</sub> , CLBO ( $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ ), DADA ( $\text{NH}_4\text{D}_2\text{AsO}_4$ ), DADP ( $\text{NH}_4\text{D}_2\text{PO}_4$ ), DCDA ( $\text{CsD}_2\text{AsO}_4$ ), DKDA ( $\text{KD}_2\text{AsO}_4$ ), DKDP ( $\text{KD}_2\text{PO}_4$ ), DRDA ( $\text{RbD}_2\text{AsO}_4$ ), DRDP ( $\text{RbD}_2\text{PO}_4$ ), KDA ( $\text{KH}_2\text{AsO}_4$ ), KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), RDA ( $\text{RbH}_2\text{AsO}_4$ ), RDP ( $\text{RbH}_2\text{PO}_4$ ), ZGP ( $\text{ZnGeP}_2$ )
$\bar{4}2m$	
$\bar{6}$	BABF ( $\text{BaAlBO}_3\text{F}_2$ )
6mm	CdSe
$\bar{6}m2$	GaSe
6	LiIO <sub>3</sub>
3m	BBO ( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ), LiNbO <sub>3</sub> , LiTaO <sub>3</sub> , Ag <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub> , Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub> , TAS ( $\text{Ti}_3\text{AsSe}_3$ )
32	KABO ( $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ), KBBF ( $\text{KBe}_2\text{BO}_3\text{F}_2$ ), кварц, киноварь, селен, теллур

Табл.3. Максимальные значения  $\text{FOM}_{2\text{max}}$  (в  $\text{пм}^2/\text{В}^2$ ).

Кристалл	ооe (eео)	еоe (еоо)	оee (еоe)
BBO	0.9738	0.7639	0.6567
LiNbO <sub>3</sub>	2.8584	0.1209	0.0129
LB4	0.004	–	–
Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>	9.64	9.11	8.93
KDP	0.042	0.043	0.035
CLBO	0.162	0.176	0.176
KABO	0.046	0.034	0.025
KBBF	0.068	0.053	0.045
GaSe	140.2	131.8	127.7
ZnGeP <sub>2</sub>	154.6	155.7	–
BABF	0.315	0.148	0.121

этом случае  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  определяется одним коэффициентом  $d_{22}$  [4, 5].

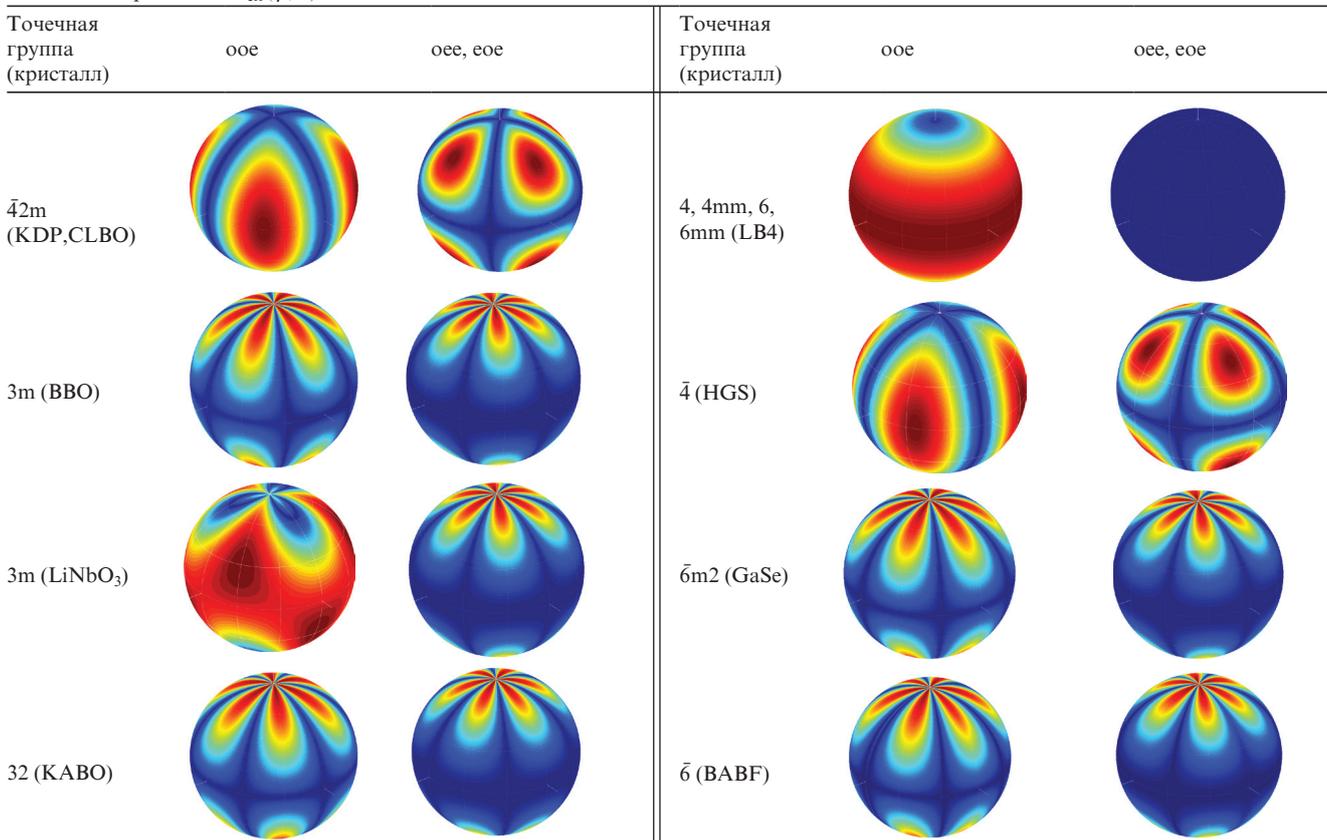
На рис.3 приведены распределения  $\text{FOM}_2(\lambda_1, \lambda_2)$  для нескольких кристаллов. Значения  $\text{FOM}_{2\text{max}}$  приведены в табл.3.

Кристаллы CLBO и  $\text{ZnGeP}_2$  (рис.3,а и б) принадлежат к одной и той же точечной группе  $\bar{4}2m$ , что и кристалл KDP (рис.1). Для отрицательного кристалла CLBO общий характер распределения  $\text{FOM}_2(\lambda_1, \lambda_2)$  в целом аналогичен таковому для KDP (характер различий описан

ниже). Однако для оеe-типа взаимодействия диапазон длин волн, в пределах которого реализуется фазовый синхронизм, значительно больше. Существенное различие имеет место для положительного кристалла  $\text{ZnGeP}_2$ . Это обусловлено, во-первых, тем, что вид распределений  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  для положительных кристаллов противоположен распределениям для отрицательных кристаллов по типам взаимодействия (табл.2). Во-вторых, есть специфическая дисперсионная зависимость угла синхронизма. Это приводит к тому, что в случае еоо-типа взаимодействия фазовый синхронизм для  $\text{ZnGeP}_2$  отсутствует во всем диапазоне прозрачности кристалла. Для тигаллата серебра той же точечной группы  $\bar{4}2m$  характер распределения  $\text{FOM}_2(\lambda_1, \lambda_2)$  в целом аналогичен таковому для кристалла KDP.

Для кристаллов BBO (рис.3,в) и LiNbO<sub>3</sub> (рис.3,г) точечной группы 3m, как отмечалось выше, распределения  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  значительно различаются в случае ооe-типа вза-

Табл.2. Распределения  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$ .



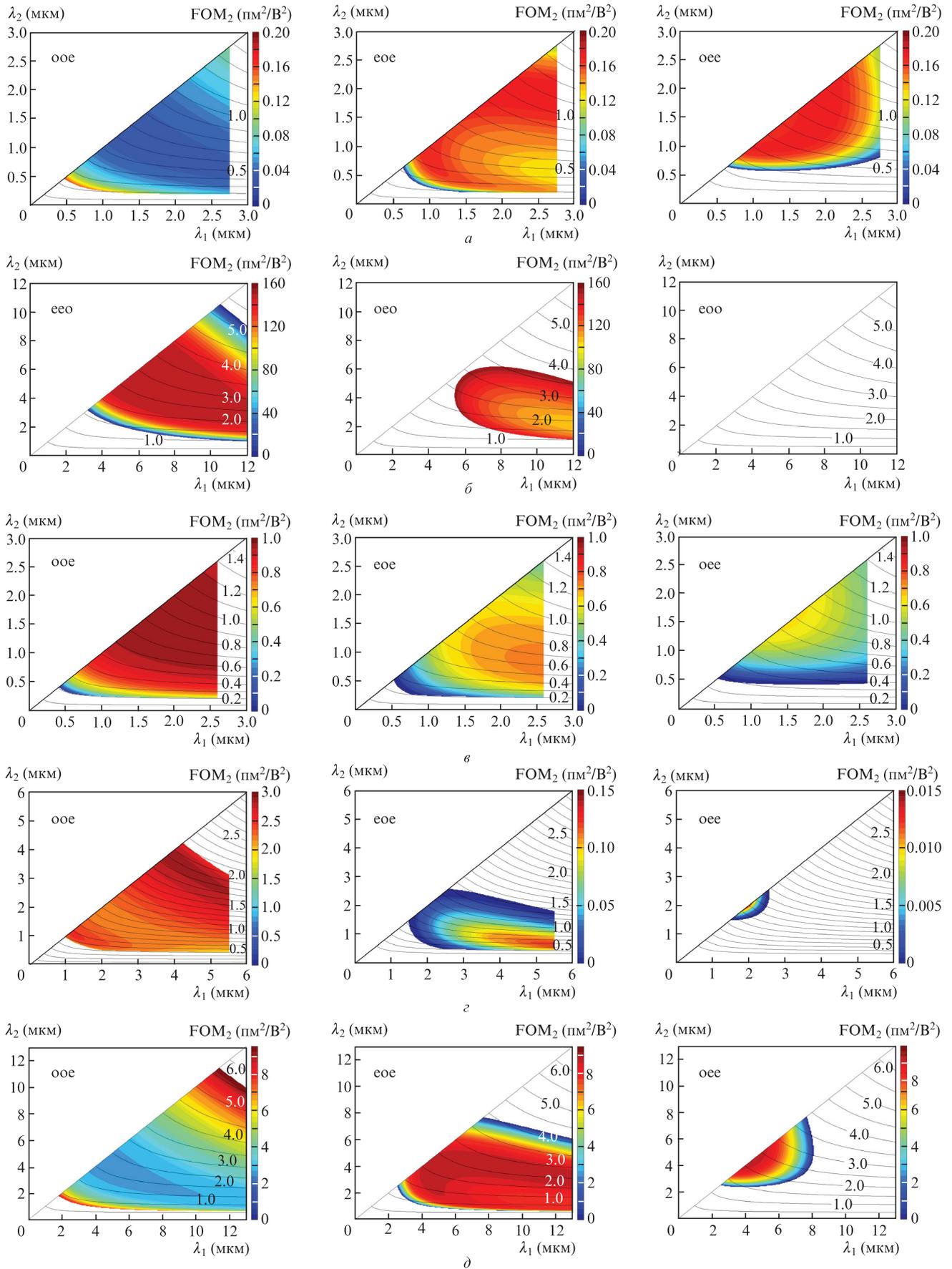


Рис.3. Распределения  $FOM_2$  для кристаллов CLBO ( $\bar{4}2m$ ) (a), ZnGeP<sub>2</sub> ( $\bar{4}2m$ ) (б), BBO (3m) (в), LiNbO<sub>3</sub> (3m) (г) и Ag<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub> (3m) (д) при различных типах взаимодействия. Цифры на кривых – значения  $\lambda_3$  в мкм.

имодействия. Для  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  это проявляется в различии областей, где величина его максимальна. Такой вид  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  для этих двух кристаллов при взаимодействии еое- и оое-типов обусловлен различием дисперсионных зависимостей угла синхронизма  $\theta_{\text{phm}}$ . Для кристалла  $Ag_3SbS_3$  (рис.3,д) той же точечной группы  $3m$  имеются свои количественные различия. Для кристаллов точечных групп 4,  $4mm$ , 6,  $6mm$  процесс преобразования при взаимодействии оое- и еое-типов отсутствует в силу равенства нулю  $d_{\text{eff}}$  (табл.2).

В статье не отражены результаты для смешанных соединений (например,  $Hg_yGa_{2-y}S_4$  [6],  $AgGa_{1-x}In_xSe_2$ ,  $Hg_{1-x}Cd_xGa_2S_4$  [7, 8],  $LiAB_2$  ( $A = Ga, In; B = S, Se$ ) [9],  $LiGaX_2$  ( $X = S, Se, Te$ ) [10]), для которых, как правило, общий характер распределений  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  не меняется при некотором изменении диапазона прозрачности и величины  $d_{\text{eff max}}$ . Это же относится и к кристаллам ADA–DADA, ADP–DADP, CDA–DCDA, KDA–DKDA, KDP–DKDP, RDA–DRDA и RDP–DRDP с различной степенью дегитерирования.

Для кристалла пираргирита на момент выполнения работы не были точно известны соотношения знаков для коэффициентов  $d_{ij}$ . Для кристалла BABF использовались коэффициенты  $d_{11} = 0.165$  пм/В и  $d_{22} = 1.32$  пм/В, приведенные в работах [11–13] как частное сообщение Ch.Chen.

Зависимость  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  позволяет определить основные частотные характеристики для всех процессов преобразования частоты. Экстремум зависимости  $\theta_{\text{phm}}(\lambda)$  соответствует не критичному по частоте синхронизму (НКЧС). В этом случае для одноосных кристаллов в широком диапазоне длин волн волновая расстройка  $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 = 0$  и не меняется ( $d\Delta k/d\lambda = 0$ ,  $d^2\Delta k/d\lambda^2 \neq 0$ ), что сопровождается неизменностью угла синхронизма  $\theta_{\text{phm}}$  (например, для кристалла KDP (рис.2)). При этом остается постоянной и величина  $d_{\text{eff}}$ . Экстремальные значения  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  и  $\theta_{\text{phm}}(\lambda_1, \lambda_2)$  будут иметь место при близких друг к другу значениях  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Смещением экстремума  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  относительно экстремума  $\theta_{\text{phm}}(\lambda_1, \lambda_2)$ , как правило, можно в большинстве случаев пренебречь в виду малости дисперсии показателя преломления для рассматриваемой задачи. Дисперсией коэффициентов тензора  $d_{ijk}$  здесь мы пренебрегаем. Исходя из этого, в режиме НКЧС в широком диапазоне длин волн величина  $FOM_2(\lambda_1, \lambda_2)$  не будет изменяться.

Однако это справедливо не для всех точечных групп. Для дальнейшего необходимо отметить основные особенности зависимостей  $d_{\text{eff}}$  и  $\theta_{\text{phm}}$  от длины волны одноосных кристаллов. Для большинства точечных групп кристаллов зависимость  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  (табл.2) является монотонной в диапазоне углов  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  (убывающей или возрастающей). В этом случае при наличии экстремума дисперсионной зависимости  $\theta_{\text{phm}}$  будет иметь место и экстремум зависимости  $d_{\text{eff}}(\varphi, \theta)$  (рис.2), а следовательно и  $FOM_2$ . В частности, для оое-типа взаимодействия точечной группы  $\bar{4}2m$  существование экстремума несложно определить через равенство нулю производной

$$dFOM_{2\text{оое}}/d\lambda = -d_{36}\cos\theta_{\text{phm}}\sin(2\varphi_{\text{opt}})d\theta_{\text{phm}}/d\lambda.$$

Исключение составляют точечные группы  $\bar{4}2m$ ,  $\bar{4}$ ,  $3m$  кристалла  $LiNbO_3$  при взаимодействии еое- и оое-типов (табл.2). Для них экстремум  $FOM_2$  определяется экстремумом как  $d_{\text{eff}}(\lambda)$ , так и  $\theta_{\text{phm}}(\lambda)$ . Для точечной группы  $\bar{4}2m$  при взаимодействии еое- и оое-типов

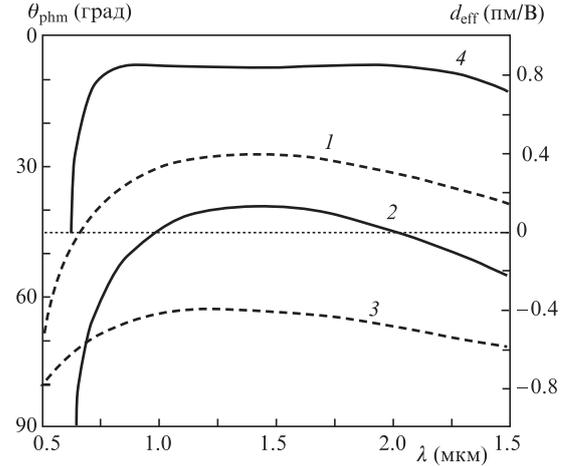


Рис.4. Дисперсионные зависимости  $\theta_{\text{phm}}$  (1, 2) и  $d_{\text{eff}}$  (3, 4) в случае кристалла CLBO при ГВГ для оое- (1, 3) и еое-типов (2, 4) взаимодействия.

$$dFOM_{2\text{оое}}/d\lambda = 2d_{36}\cos(2\theta_{\text{phm}})\cos(2\varphi_{\text{opt}})d\theta_{\text{phm}}/d\lambda.$$

Экстремумы будут наблюдаться при  $\theta_{\text{phm}} = \pi/2$  и  $d\theta_{\text{phm}}/d\lambda = 0$ . Если  $\pi/2 \leq \theta_{\text{phm}} < \pi/4$ , характер зависимости определяется только экстремумом  $\theta_{\text{phm}}$ . В этом диапазоне углов  $\theta_{\text{phm}}$  фазовый синхронизм имеет место для подавляющего большинства кристаллов перечисленных выше точечных групп. Однако в частном случае кристалла CLBO для оое-типа синхронизма при ГВГ (рис.4) фазовый синхронизм достигается и при  $\theta_{\text{phm}} > 45^\circ$ . Минимум в центральной части зависимости  $d_{\text{eff}}(\lambda)$  соответствует максимуму  $\theta_{\text{phm}}(\lambda)$ , а два максимума – максимальным значениям  $d_{\text{eff}}$ .

Таким образом, из представленных на рис.3 результатов можно определить комбинации длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , при которых реализуется НКЧС. При ГСЧ вопрос о необходимости реализации НКЧС актуален в двух случаях:

- 1) преобразование частоты УКИ на одной из длин волн входного излучения ( $\lambda_1$  или  $\lambda_2$ ) и частоты квазистационарного импульса на другой ( $\lambda_2$  или  $\lambda_1$ );
- 2) преобразование частоты двух УКИ на  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

В первом случае рассматривается допустимая волновая расстройка между излучением УКИ с длиной волны  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$  и формируемой волной с  $\lambda_3$ , а во втором случае – попарно между обеими волнами с  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и волной с  $\lambda_3$ . Здесь, как и при традиционном определении ширин синхронизма, рассматриваются процессы для плоских монохроматических волн. Допустимая волновая расстройка определяется для крайних частот спектров импульсов.

Определим условия реализации этих режимов на примере кристалла ВВО для еое-типа взаимодействия (рис.5). НКЧС для первого случая возможен, если касательная к изолинии  $FOM_2$  параллельна оси  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$ . В этом случае в широком диапазоне изменения  $\lambda$  величина  $FOM_2$  остается постоянной и, следовательно, угол  $\theta_{\text{phm}}$  не меняется. Один из частных случаев приведен на рис.5. Так, для точки А ( $\lambda_1 = 1.46$  мкм и  $\lambda_2 = 1.13$  мкм)  $dFOM_2/d\lambda_1 = 0$ , что определяет возможность ГСЧ УКИ с длиной волны излучения  $\lambda_2$  и длинным импульсом излучения с  $\lambda_1$ . Для точки В ( $\lambda_1 = 2.17$  мкм и  $\lambda_2 = 1.63$  мкм)  $dFOM_2/d\lambda_2 = 0$ , здесь возможен НКЧС для УКИ излучения с  $\lambda_1$  и квазистационарного излучением с  $\lambda_2$ .

Общий анализ зависимостей на рис.5 показывает, что НКЧС для УКИ излучения с  $\lambda_1$  может выполняться в диа-

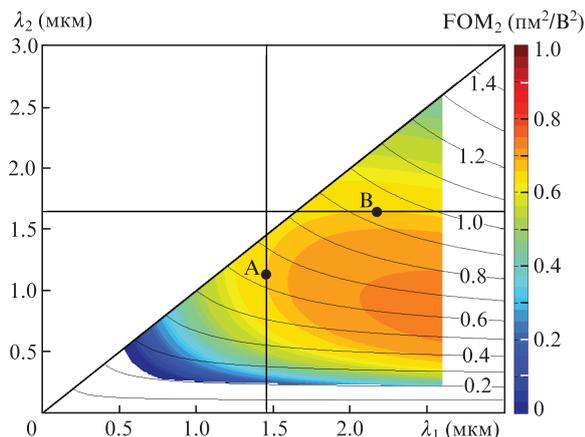


Рис.5. Распределения  $FOM_2$  в кристалле ВВО при взаимодействии еое-типа. Цифры на кривых – значения  $\lambda_3$  в мкм.

пазоне  $\lambda_1 = 1,18-2,6$  мкм, а с  $\lambda_2$  – при  $\lambda_2 = 0,87-2,0$  мкм. Выбором точки на изолинии  $FOM_2$  можно задавать соотношение ширины спектров излучений с  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (длительностей импульсов), что создает предпосылки для наиболее эффективного преобразования частоты.

В качестве подтверждения общего характера рассмотренных зависимостей на рис.6 в традиционной форме представлены перестроечные характеристики для кристалла ВВО. При изменении длины волны  $\lambda_3$  и фиксированной величине  $\theta$  зависимости  $\lambda_1(\lambda_3)$  имеют экстремумы (отмечены точками на кривых). В окрестности этих экстремумов величина  $\lambda_1$  остается неизменной в достаточно большом интервале изменения  $\lambda_3$ , а  $\lambda_2$  изменяется линейно. Это свойство имеет место при различных значениях  $\lambda_3$ , которые определяются углом  $\theta$ .

Из рис.1 и 3 видно, что для рассматриваемых кристаллов КДР (еое), CLBO (еое, оое) (при некоторых соотношениях длин волн), ZnGeP<sub>2</sub> (оео), ВВО (еое), LiNbO<sub>3</sub> (еое) и Ag<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub> (еое) возможна ГСЧ при узкополосном излучении одной из волн и широкополосном излучении другой волны. Также возможна ГСЧ для двух волн с  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и широким спектром.

Аналогично данные рис.1 и 3 дают информацию о потенциальных характеристиках кристаллов при параметрической генерации света как обратной ГСЧ задаче. При заданной величине  $\lambda_3$  можно определить требуемые диапазоны длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для различных типов взаимодействия. Также можно оценить возможность формирования излучения с различными шириной спектра (по аналогии, например, с рис.5) и отношением ширины спектров

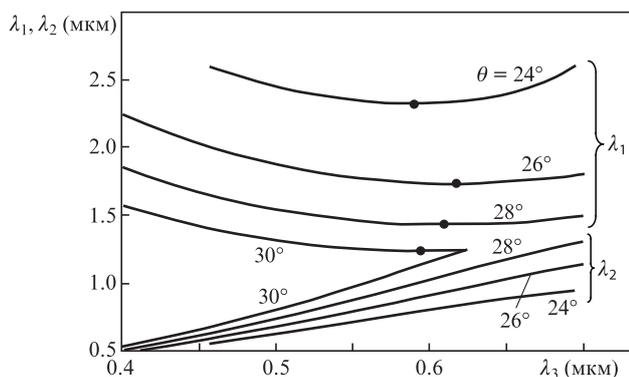


Рис.6. Перестроечные характеристики для кристалла ВВО (еое-тип взаимодействия).

обеих волн. Скорость изменения  $FOM_2$  связана с диапазоном изменения угла  $\theta$  для получения перестройки по длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Наличие касательных к изолиниям  $FOM_2$  (рис.5), имеющее место, например, для кристаллов КДР (оое), CLBO (еое), ZnGeP<sub>2</sub> (оео), ВВО (оое, оое), LiNbO<sub>3</sub> (оое, еое), Ag<sub>3</sub>SbS<sub>3</sub> (оое, еое), характеризует режим, при котором в направлении, определяемом углом  $\theta$ , формируется широкополосное излучение на длинах волн  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$  при узкополосной накачке на  $\lambda_3$ . При ГРЧ существует возможность формирования и усиления импульса с широким спектром излучения (например, импульса фемтосекундной длительности) в поле узкополосного излучения с  $\lambda_3$ . Также возможно и обратное – формирование узкополосного излучения на  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$  при широкополосном излучении на длине волны  $\lambda_3$  (точки А или В соответственно на рис.5).

Для простого анализа возможностей реализации процесса ГРЧ в различных кристаллах распределения  $FOM_2$  могут быть представлены относительно длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  ( $FOM_2(\lambda_1, \lambda_3)$ ), а также  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  ( $FOM_2(\lambda_2, \lambda_3)$ ).

Таким образом, предлагаемая методика описания характеристик и представления результатов является удобным и наглядным справочным материалом для определения функциональных возможностей кристаллов в задачах преобразования частоты, а также для сравнительного анализа их при решении различных прикладных задач. Полученные результаты показывают возможность определения частотных характеристик для различных процессов.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Е.В.Юговой за помощь на различных этапах работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-02-07760, Проекта СО РАН VIII.80.2.4, гранта Томского государственного университета № 8.1.51.2015 и, в части разработки методики анализа и обработки результатов С.Г.Гречиным и П.П.Николаевым, гранта РНФ № 15-11-10023.

1. Летохов В.С. *Лазерная фотоионизационная спектроскопия* (М.: Наука, 1987, с.319)
2. Letokhov V.S. *Laser Control of Atoms and Molecules* (Oxford University Press, 2007, p.320).
3. Hannaford P. (Ed.) *Femtosecond Laser Spectroscopy* (Boston: Springer Science & Business Media, 2005, p.350).
4. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan D.N. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals* (3rd revised ed.) (Berlin: Springer, 1999).
5. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.А. *Прикладная нелинейная оптика* (М.: Физматлит, 2004).
6. Wang T.-J., Kang Zh.-H., Zhang H.-Zh., Feng Zh.-Sh., Wu F.-G., Zang H.-Y., Jiang Y., Gao J.-Y., Andreev Y., Lanski G., Atuchin V., Parasyuk O. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 1913 (2007).
7. Ji G., Shen T., Huang J., Zhao B., Andreev Yu.M., Atuchin V.V., Lanskiy G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6595**, 659514 (2007).
8. Petrov V., Rotermund F., Badikov V.V., Shevyrdyaeva G.S. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'03)* (Baltimore, 2003, p.CMA5).
9. Petrov V., Noack F., Isaenko L., Yelissev A., Lobanov S., Titov A., Rotermund F., Zondy J.-J. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'03)* (Baltimore, 2003, CTuN5, pp 733–734).
10. Isaenko L., Yelissev A., Lobanov S., Titov A., Krinitin P., Petrov V., Zondy J.-J. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO'03)* (Baltimore, 2003, CWA15, pp 1000–1001).
11. Yoshimura M., Mori Y., Hu Z.G., Sasaki T. *Opt. Mater.*, **26**, 421 (2004).
12. Zhou Y., Wang G., Yue Y., Li Ch., Lu Y., Cui D., Hu Zh., Xu Z. *Opt. Lett.*, **34**, 746 (2009).
13. Zhou Y., Yue Y., Wang J., Yang F., Cheng X., Cui D., Peng Q., Hu Zh., Xu Z. *Opt. Express*, **17**, 20033 (2009).