

YCOB 晶体非共线相位匹配技术研究

孙美智 毕群玉 张福领 康俊 谢兴龙 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所国家高功率激光物理实验室, 上海 201800)

摘要 以中心波长为 1053 nm 的信号光及中心波长为 532 nm 的抽运光光参变放大过程为例,通过数值模拟,详细分析了三硼酸氧钙钇[YCa₄O(BO₃)₃, YCOB]晶体 XOY 与 XOZ 主平面内,非共线相位匹配的匹配特点与增益特性。按照相位匹配技术主要参数定义要求,不经近似,通过数值计算,给出了最佳非共线角、相位匹配角、参量带宽、走离角、接收角和有效非线性系数与增益带宽。结果显示, YCOB 晶体具有很大的增益带宽与较大的增益,较大的接收角和小的走离角;作为增益介质,不仅可以用于大能量高功率固体激光器,也可以用于几十飞秒量级超短脉冲激光系统。

关键词 非线性光学;光参变啁啾脉冲放大;非共线相位匹配;超宽带增益;三硼酸氧钙钇晶体

中图分类号 O437.3; TN242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0119001

Study on Noncollinear Phase Matching in YCOB Crystal

Sun Meizhi Bi Qunyu Zhang Fuling Kang Jun Xie Xinglong Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The non-collinear phase matching in XOY and XOZ principal planes of yttrium calcium oxyborate (YCOB) crystal is analyzed in detail with signal pulse of central wavelength at 1053 nm and pump pulse of wavelength at 532 nm. Based on the concepts without numerical approximation, the optimal noncollinear angles, phase-matching angles, parametric bandwidths, walk-off angles, acceptance angles, efficiency coefficients, and gain bandwidths are presented. It is concluded that the YCOB crystals have broad gain bandwidth, high gain, big acceptance angle and small walk-off angle, and they can be utilized as gain media both in high-energy high-power solid-state lasers and tens of femtoseconds ultra-short pulsed laser systems.

Key words nonlinear optics; optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA); noncollinear phase-matching; ultra-broadband gain; YCOB crystal

OCIS codes 190.4410; 140.4480

1 引言

超强固体激光技术在过去十多年内取得了迅猛发展,主要原因之一是先进激光增益介质被陆续发明及其制造工艺逐步完善^[1]。三硼酸氧钙钇(YCOB)是 20 世纪 90 年代末发明的一种新型非线性晶体^[2,3],与传统非线性晶体相比,具有许多显著优点。首先,相比 KDP 与 DKDP 晶体,三硼酸氧钙钇(YCOB)晶体具有更大的有效非线性系数,更容

易获得较高的增益与转换效率;其次,相比 LBO 与 BBO 晶体只能生长到 2 cm 口径与长度, YCOB 晶体能够在更短的时间内生长出口径 7.5 cm 长度达到 25 cm 的大块晶体^[4],因此可以作为高功率激光系统后级光放大的增益介质。最后, YCOB 晶体具有优良的光热性质,使其不仅可以应用于单脉冲高能高功率系统,也可以在重复频率 10 Hz 激光系统中实现平均功率千瓦输出^[5~7]。基于以上优点,近

收稿日期: 2010-04-22; **收到修改稿日期**: 2010-06-17

作者简介: 孙美智(1984—),博士研究生,主要从事超短超强激光脉冲技术方面的研究。

E-mail: eric913@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 林尊琪(1942—),中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变各单元技术等方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

年来 YCOB 晶体在国内外受到越来越多的关注与研究,被应用于高功率固体激光系统特别是在大能量与高重复频率光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)系统中表现不俗^[4,8]。

目前,国内外对 YCOB 晶体中的相位匹配技术的研究主要集中在二次谐波产生(SHG)与三次谐波产生(THG)^[2,9~11],其在非共线相位匹配技术中的应用并未见诸文献报道。本文以 1053 nm 信号光在 YCOB 晶体中由 532 nm 抽运光放大为例,分析了 YCOB 晶体 XOZ, XOY 两个主平面中的相位匹配,从定义出发,通过数值计算,给出了最佳非共线角、相位匹配角、参量带宽、走离角、接收角、有效非线性系数、增益以及增益带宽等主要参数及其变化趋势,这在 YCOB 晶体光参量放大器设计中具有实际指导意义。

2 YCOB 晶体非共线相位匹配参量特性

2.1 非共线相位匹配

光参量放大(OPA)是三波耦合的非线性过程。在晶体主轴坐标系中,三波矢量关系如图 1 所示, k_s, k_i, k_p 分别表示信号光,闲置光和抽运光波矢, θ 表示抽运光波矢与 Z 轴夹角, φ 表示抽运光波矢在

XOY 平面内的投影与 X 轴的夹角, α 表示信号光与抽运光的夹角(非共线角), β 表示闲置光与抽运光的夹角, ρ 表示抽运光走离角, Ω 为光轴角, s_p 表示抽运光能流方向, c_1, c_2 表示两个光轴。三波满足动量和能量守恒,参量放大过程将会产生中心波长为 1075 nm 且具有角色散特性的闲置光脉冲^[12]。

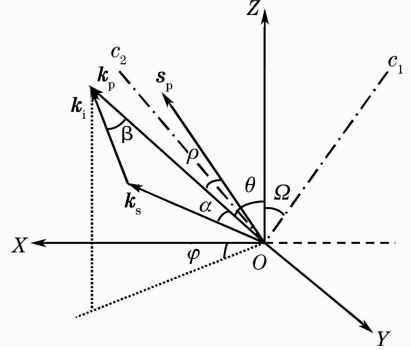


图 1 双轴晶体非共线相位匹配矢量图

Fig. 1 Noncollinear phase-matching vectors in biaxial crystals

对于双轴晶体,主轴坐标系中规定主轴折射率满足 $n_x < n_y < n_z$; YCOB 晶体折射率曲面方程与色散方程可参考文献[13,14]。假设三束光波在 XOY 主平面内相互作用, $\theta = 90^\circ$, 可以推算出光参量放大第一类匹配方式 $e_s + e_s \rightarrow e_f$ 的匹配角^[15]以及相位失配因子可表达为

$$\varphi_{pm} = \arcsin \left\{ \left[\frac{n_{yp}^2 / \lambda_p^2 - (n_{zs} \cos \alpha / \lambda_s + n_{zi} \cos \beta / \lambda_i)^2}{n_{yp}^2 - n_{xp}^2} \right]^{1/2} \frac{n_{xp}}{n_{zs} \cos \alpha / \lambda_s + n_{zi} \cos \beta / \lambda_i} \right\}, \quad (1)$$

$$\Delta k = \Delta k_{//} = 2\pi n_p / \lambda_p - 2\pi n_s \cos \alpha / \lambda_s - 2\pi n_i \cos \beta / \lambda_i. \quad (2)$$

式中 $\lambda_s, \lambda_i, \lambda_p$ 分别表示信号光、闲置光与抽运光波长, n_{xp}, n_{yp} 分别表示抽运光在 X 主轴和 Y 主轴上的折射率, n_{zs}, n_{zi} 分别表示信号光与闲置光在 Z 主轴上的折射率, β 表示闲置光与抽运光的夹角, 且 $\beta = \arcsin[(n_{zs}/n_{zi})(\lambda_i/\lambda_s)\sin \alpha]$, n_s, n_i, n_p 分别表示在任意 (θ, φ) 方向上信号光、闲置光与抽运光的折射率。相位匹配角以及相位失配因子在 XOZ 主平面内的表达式只需要将(1),(2)式中各个参数作如下替换: $n_{yp} \rightarrow n_{xp}, n_{xp} \rightarrow n_{yp}, n_{zs} \rightarrow n_{ys}, n_{zi} \rightarrow n_{yi}, \varphi_{pm} \rightarrow \theta_{pm}$ 即可。YOZ 主平面内第一类匹配方式参量放大过程有效非线性系数极小,文中不予讨论;另外,三个主平面内第二类匹配方式情况可参考文献[13]以及本文计算方法讨论,限于篇幅在此不做赘述。

2.2 参量带宽与最佳非共线角

参量带宽是指使在信号光中心波长处实现相位

匹配的同时,使相位失配局限在 $(-\pi, \pi)$ 区间之内的波长范围,即满足关系 $|\Delta kL| < \pi$ 的波长区间,其中 L 表示晶体长度。参量带宽的求解方法包括两种:1)通过泰勒展开,可以明确给出数学表达式,从而建立统一模型^[16];2)从定义出发,分别求解相位失配 $\pm \pi$ 对应的两个波长对中心波长的偏移^[17]。前者在脉冲谱宽不大的时候可以比较精确的给出参量带宽值,但对于,频谱宽度近百纳米的超短脉冲参量放大过程,作前一种方法得参量带宽将具有很大误差,所以只有从定义出发,通过数值计算,才能得到准确带宽。

假设 $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}$ 分别表示相位失配 $\pi, -\pi$ 的信号光波长, λ_{s0} 表示信号光中心波长,那么信号光中心波长处, YCOB 晶体参量带宽为对中心波长最小允许偏移量的两倍。在 XOY 与 XOZ 主平面内的具体

计算过程以及参量带宽表达式分别为

$$|2\pi n_{p(\varphi_{pm})}/\lambda_p - 2\pi n_{zs} \cos \alpha/\lambda_s - 2\pi n_{zi} \cos \beta/\lambda_i| = \pi/L, \quad (3)$$

$$|2\pi n_{p(\theta_{pm})}/\lambda_p - 2\pi n_{ys} \cos \alpha/\lambda_s - 2\pi n_{yi} \cos \beta/\lambda_i| = \pi/L, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{para} = 2\min(|\lambda_{s1} - \lambda_{s0}|, |\lambda_{s2} - \lambda_{s0}|). \quad (5)$$

根据(3)~(5)式,通过数值求解,得到中心波长为 1053 nm 的信号光在 YCOB 晶体 XOY 与 XOZ 主平面内的参量带宽随非共线角的变化分别如图 2(a),(b)所示。

由图 2 可以看出,参量带宽对非共线角的变化

非常敏感。对于长度 10 mm 的 YCOB 晶体而言, XOY 主平面内,在 $\alpha=0.91^\circ$ 时参量带宽达到最大值约 100 nm; XOZ 主平面内与 XOY 主平面内具有相似变化关系,在 $\alpha=0.9^\circ$ 时参量带宽达到最大值 96 nm。对于固定长度的晶体,由于参量带宽是其增益带宽的极限,所以非共线角的选择对晶体的增益特性有着重要影响。最佳非共线角即是使参量带宽最大的非共线角。从图中可以看到,对于以 1053 nm 中心波长信号光,532 nm 波长抽运光的光参量放大过程,非线性晶体 YCOB 在 XOY 与 XOZ 主平面内的最佳非共线角分别是 $0.91^\circ, 0.90^\circ$ 。

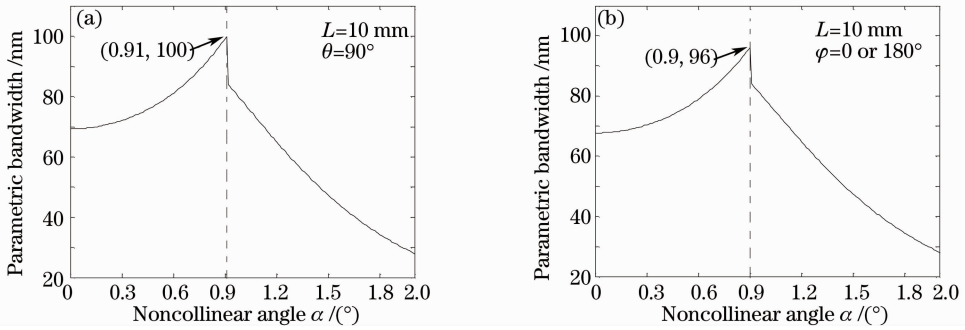


图 2 参量带宽随非共线角的变化关系。(a)XOY 主平面,(b)XOZ 主平面内

Fig. 2 Variation relationships between parametric bandwidths and noncollinear angles. (a) XOY principal plane, (b) XOZ principal plane

2.3 相位匹配曲线

根据(1)式,以 532 nm 单色光作为抽运光,在 YCOB 晶体中,相位匹配角在 XOY 主平面与 XOZ 主平面内,不同非共线角 α 条件下,匹配角随信号光波长 λ_s 的变化关系如图 3 所示。

由图 3 曲线变化趋势可以看出,对于 YCOB 晶体,无论在 XOZ 主平面还是在 XOY 主平面内,在

1053 nm 中心波长处,总存在许多非共线角使得非共线匹配方式比共线匹配方式具有更大的参量带宽,而且由最佳非共线角确定的匹配角附近具有绝对值最小的斜率,这说明这个匹配角是最佳匹配角。在 XOY 主平面内最佳匹配角是 $(90^\circ, 35.98^\circ)$; XOZ 主平面内的最佳匹配角可能是 $(30.50^\circ, 0)$ 或者 $(30.50^\circ, 180^\circ)$ 。

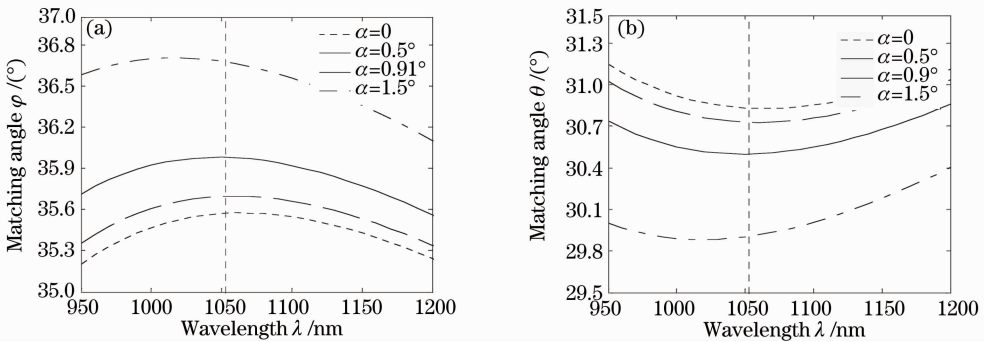


图 3 不同非共线角条件下相位匹配曲线。(a)XOY 主平面,(b)XOZ 主平面

Fig. 3 Phase-matching curves with various noncollinear angle. (a) XOY principal plane, (b) XOZ principal plane

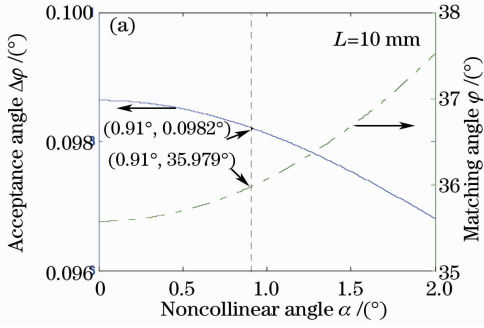
2.4 最佳匹配角接收角与走离角

接收角是指在中心波长处,最佳匹配角附近,使相位失配量局限在 $(-\pi, \pi)$ 区间的匹配角偏移量。

接收角是小量,可以通过级数展开近似求解。根据(2)式,在 XOY 与 XOZ 主平面内接收角分别满足^[18]

$$\Delta\varphi = 2\lambda_p n_p^{-3} / [L(n_{yp}^{-2} - n_{xp}^{-2}) \sin 2\varphi], \quad (6)$$

$$\Delta\theta = 2\lambda_p n_p^{-3} / [L(n_{xp}^{-2} - n_{zp}^{-2}) \sin 2\theta]. \quad (7)$$



接收角与相位匹配角随非共线角的变化关系分别如图 4 所示。

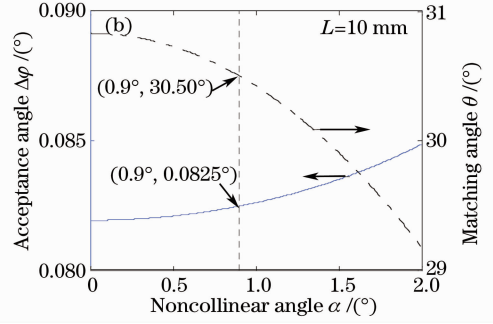


图 4 接收角随非共线角的变化关系。(a) XOY 主平面, (b) XOZ 主平面

Fig. 4 Variation relation between acceptance angles and noncollinear angles. (a) XOY principal plane, (b) XOZ principal plane

走离角是指晶体中传播的光束相位传播方向与能流方向的夹角, 决定了非线性晶体的有效长度。在 XOY 与 XOZ 主平面内, 对于第一种匹配类型, 抽运光存在一个空间走离角, 可分别表示为

$$\rho_{XOY} = \arctan\left[\frac{1}{2} \frac{(n_{xp}^2 - n_{yp}^2)}{(n_{yp}^2 \sin^2 \varphi + n_{xp}^2 \cos^2 \varphi)} \sin 2\varphi\right], \quad (8)$$

$$\rho_{XOZ} = \arctan\left[\frac{1}{2} \frac{(n_{zp}^2 - n_{xp}^2)}{(n_{xp}^2 \sin^2 \theta + n_{zp}^2 \cos^2 \theta)} \sin 2\theta\right]. \quad (9)$$

走离角随非共线角的变化关系如图 5 所示。

如图 4 所示, XOY 与 XOZ 主平面内接收角均大于 0.08° , 并且在最佳非共线角 α 处接收角分别取值 $0.0982^\circ, 0.0825^\circ$; 两个主平面内, 走离角符号相反, 绝对值均小于 1.3° , 在最佳非共线角处分别取值 $-1.041^\circ, 1.247^\circ$, 走离角的正负决定了抽运光波前畸变对信号光光束质量的影响^[19]。非线性晶体有效长度是光束口径与走离角正切值之比, 那么假设抽运光光束口径为 1 mm, 两个走离角决定 YCOB 晶体的有效长度分别是 55 mm 和 46 mm。

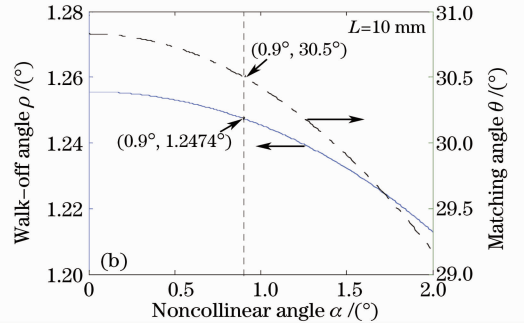
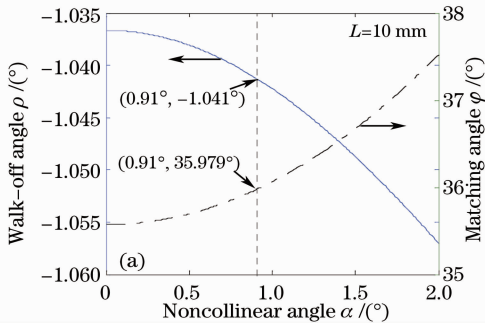


图 5 抽运光走离角与非共线角的变化关系。(a) XOY 主平面, (b) XOZ 主平面

Fig. 5 Variation relation between walk-off angles of the pump pulse and noncollinear angles. (a) XOY principal plane, (b) XOZ principal plane

2.5 增益与增益带宽

光参变啁啾脉冲放大(OPCPA)系统中, 非线性晶体的增益特性决定了系统能量转换效率, 增益带宽决定了被放大脉冲的带宽, 从而决定其时域傅里

叶变换极限。有效非线性系数是影响晶体增益特性的一个重要参数。YCOB 晶体在 XOY 与 XOZ 主平面内第一类相位匹配方式的有效非线性系数分别为^[20,21]

$$d_{\text{eff}} = d_{13} \sin \varphi, \quad (10)$$

$$d_{\text{eff}} = \begin{cases} d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta & (0 \leq \theta < \Omega, \quad \varphi = 0) \\ d_{12} \cos \theta + d_{32} \sin \theta & (0 \leq \theta < \Omega, \quad \varphi = 180^\circ), \\ 0 & (\Omega < \theta \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $d_{13} = -0.59 \text{ pm/V}$, $d_{12} = 0.235 \text{ pm/V}$, $d_{32} = 1.62 \text{ pm/V}$ ^[22]。通过(11)式可以看出, XOZ 主平面内, 在 $0 < \theta < \pi/2$ 时, 相比取值 0 的情况, φ 取值 180° 对应的有效非线性系数更大, 因此具有更高的增益, 最佳匹配角是 $(30.50^\circ, 180^\circ)$ 。通过计算可以得到 XOY 与 XOZ 主平面内, 有效非线性系数绝对值分别等于 0.3466 pm/V 和 1.0290 pm/V 。

光参变放大过程增益特性可表达为^[23]

$$G = 0.25 \exp\{2[\Gamma^2 - (\Delta k/2)^2]^{1/2} L\}, \quad (12)$$

$$\Gamma = 4\pi d_{\text{eff}} \sqrt{I_p/2\epsilon_0 n_p n_s n_i} c \lambda_s \lambda_i \cos(\alpha - \rho) \cos(\beta - \rho), \quad (13)$$

其中非线性晶体长度 L 要求小于有效长度。增益带宽被定义为增益满足大于等于二分之一中心波长

增益条件的波长范围, 即满足关系式 $G = 0.5G_{(\Delta k=0)}$ 的波长范围。

与计算参变带宽相同的方法, 通过数值分析, 得到 YCOB 晶体 XOY 平面与 XOZ 平面内的增益特性如图 6 所示, 增益带宽随抽运光功率密度以及非线性晶体长度的变化关系分别如图 7 所示。

图 6 给出 10 mm 长度的晶体中, 在抽运光功率密度 3 GW/cm^2 条件下, 两个主平面内不同非共线角对应的增益曲线。波长 1053 nm 处, 在 XOY 主平面内, 由于较小的有效非线性系数, 最佳非共线角 0.91° 对应的增益是 3.95; 相同条件下, XOZ 主平面内的增益达到 960。

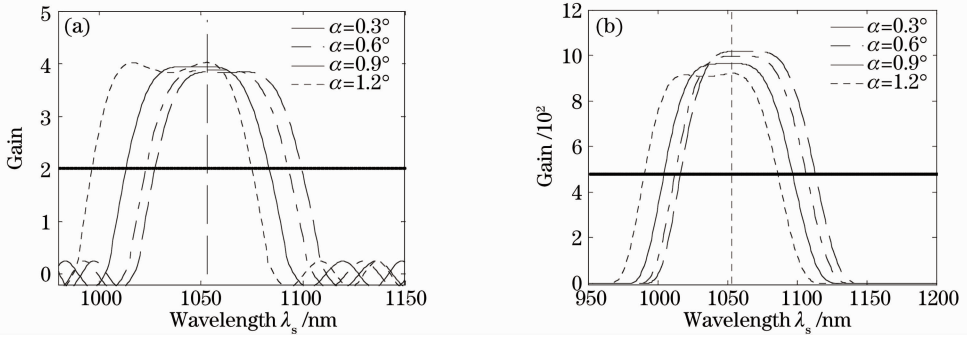


图 6 不同非共线角条件下, YCOB 晶体的增益曲线。(a) XOY 主平面, (b) XOZ 主平面

Fig. 6 Gain curves of YCOB crystals with various noncollinear angles (a) XOY principal plane, (b) XOZ principal plane

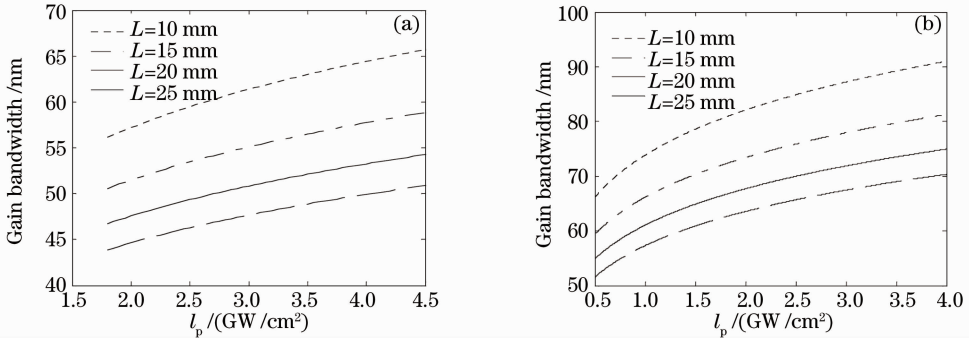


图 7 不同长度 YCOB 晶体增益带宽与抽运光功率密度的变化关系。(a) XOY 主平面, (b) XOZ 主平面

Fig. 7 Variation relation between gain bandwidth and pump irradiance in crystals of various lengths. (a) XOY principal plane, (b) XOZ principal plane

图 7 给出不同长度的晶体, 在两个主平面内的增益带宽随抽运光功率密度的变化曲线。两图显示同样的规律: 在相同的抽运光功率密度条件下, 晶体越长, 增益带宽越小; 对于固定长度的晶体, 随着抽运光功率密度的提高, 增益带宽越来越大, 但增速减慢。10 mm 长度的 YCOB 晶体, 在抽运光功率密度 3 GW/cm^2 情况下, XOY 与 XOZ 主平面内的增益带宽分别是 62 nm 和 87 nm 。由于在傅里叶变换极限

条件下, 高斯型脉冲带宽 $(\Delta\lambda)$ 与脉宽 (Δt) 满足 $\Delta\lambda \cdot \Delta t = 2 \ln 2 \lambda_0^2 / (\pi c)$, 这说明两个主平面内, 在 1053 nm 中心波长处可支持 26.31 fs 和 18.75 fs 的超短脉冲放大, YCOB 晶体可以作为几十飞秒量级超短脉冲放大系统的增益介质。

3 结 论

以中心波长 1053 nm 信号光, 532 nm 抽运光的

光参量放大过程为例,分析了 YCOB 晶体 XOY 主平面 XOZ 主平面内相位匹配特点,给出了相位匹配技术的最佳非共线角、最佳匹配角、最大参变带宽、接收角、走离角、有效非线性系数与增益带宽等主要参数。通过各参数取值可以看出,作为增益介质,YCOB 晶体不仅可以用于大能量高功率固体激光器,也可以用于几十飞秒量级的超短脉冲激光系统。

参 考 文 献

- Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of science [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 721~729
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. 中国激光, 2002, **33**(6): 721~729
- R. Norrestam, M. Nygren, J. O. Bovin. Structural investigations of new calcium-rare earth (R) oxyborates with the composition $\text{Ca}_4\text{RO}(\text{BO}_3)_3$ [J]. *Chem. Mater.*, 1992, **4**(3): 737~743
- M. Iwai, T. Kobayashi, H. Furuya *et al.*. Crystal growth and optical characterization of rare-earth (Re) calcium oxyborate $\text{ReCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (Re = Y or Gd) as new nonlinear optical material [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(2): 276~279
- Zhi M. Liao, Igor Jovanovic, Chris A *et al.*. Ebbbers. Energy and average power scalable optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1277~1279
- Erhard W. Gaul, Mikael Martinez, Joel Blakeney *et al.*. Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(9): 1676~1681
- C. A. Ebbbers, A. J. Bayramian, R. W. Campbell *et al.*. High average power frequency conversion with large aperture YCOB [C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2008, WD3
- K. Schaffers, A. J. Bayramian, J. A. Caird *et al.*. World record high average power frequency conversion with large aperture YCOB [C]. *Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications*, 2007, ThC1
- E. Gaul, M. Martinez, J. Blakeney *et al.*. Activation of a 1.1 Petawatt hybrid, OPCPA-Nd:glass laser [C]. *CLEO/QELS*, 2009, JWB2
- Z. Wang, K. Fu, X. Xu *et al.*. The optimum configuration for the third-harmonic generation of $1.064 \mu\text{m}$ in a YCOB crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **72**(7): 839~842
- Michael V. Pack, Darrell J. Armstrong, Arlee V. Smith *et al.*. Measurement of the $\chi^{(2)}$ tensor of $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ and $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(2): 417~425
- Z. Wang, J. Liu, R. Song, H. Jiang *et al.*. Anisotropy of nonlinear-optical property of RCOB (R = Gd, Y) crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(3): 385~387
- Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995. 1~5
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 1~5
- Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study of phase matching of three wave noncollinear interactions optical parametric process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(2): 129~133
刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 三波非共线作用参变过程的相位匹配研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(2): 129~133
- Nobuhiro Umemura, Hiroshi Nakao, Hiroyuki Furuya *et al.*. 90° Phase-matching properties of $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ and $\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**: 596~600
- Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Study on the bandwidth of three-wave mixing optical parametric amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(8): 680~686
刘红军, 陈国夫, 赵卫等. 三波混频光参量放大器中带宽的研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(8): 680~686
- Wang Jie, Yao Jianquan, Li Xifu *et al.*. Amendatory calculation of the acceptance parameters in three-wave interactions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 139~141
王杰, 姚建铨, 李喜福等. 非线性晶体三波相互作用允许参量的修正计算[J]. 光学学报, 2001, **21**(2): 139~141
- Liu Jun, Wei Xiaofeng, Huang Xiaojun *et al.*. Study and comparison on properties of optical parametric chirped pulse amplification of BBO, LBO and KDP [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 555~558
刘军, 魏晓峰, 黄小军等. BBO, LBO, KDP 晶体光参量啁啾脉冲放大特性的比较研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 555~558
- Jianquan Yao, Weidong Sheng. Accurate calculation of the optimum phase-matching parameters in three-wave interactions with biaxial nonlinear optical crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1992, **9**(6): 891~902
- Fuling Zhang, Yanhai Wang, Meizhi Sun *et al.*. Numerical simulations of the impact of wavefront phase distortions of pump on the beam quality of OPA [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 217~220
- Wang Zhengping, Song Renbo, Juang Huaidong *et al.*. Absolute scale of nonlinear optical coefficients of YCOB crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 735~738
王正平, 宋仁波, 江怀东等. YCOB 晶体非线性光学系数的标定及空间分布[J]. 中国激光, 2001, **A28**(8): 735~738
- R. Baumgartner, R. Byer. Optical parametric amplification [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **15**(6): 432~444
- Michael V. Pack, Darrell J. Armstrong, Arlee V. Smith *et al.*. Measurement of the $\chi^{(2)}$ tensor of $\text{GdCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ and $\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(2): 417~425
- Jeffrey Moses, Cristian Manzoni, Shuwei Huang. Temporal optimization of ultrabroadband high-energy OPCPA [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5540~5555