

超宽带光参量放大器中相位匹配结构的分析和优化

王艳海¹ 张福领² 刘国才¹ 吕树慧¹

(¹ 河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018; ² 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

摘要 对光参量放大的相位匹配进行了研究,建立了产生超宽增益带宽参量放大相位匹配的一般物理模型,依据这一模型,在只给定抽运光波长和晶体参数的条件下,可以确定超宽带相位匹配结构和信号光匹配波长。以偏硼酸钡(BBO)晶体为例进行了模拟计算,结果表明,非共线相位匹配的两种不同结构有着相差极大的晶体接收角。讨论了如何优化非共线相位匹配结构参数以便得到极大增益带宽和极佳晶体接收角的问题。对 BBO 晶体光参量放大的光谱相位匹配的计算结果可以为多光束抽运或多阶段光参量放大的设计提供理论依据。

关键词 非线性光学; 光参量放大; 增益带宽; 相位匹配; 超快激光技术

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0802010

Analysis and Optimization of Phase-Matching Configuration in Ultrabroadband Optical Parametric Amplifier

Wang Yanhai¹ Zhang Fuling² Liu Guocai¹ Lü Shuhui¹

¹ School of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

² The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou, Henan 450047, China

Abstract The phase-matching configuration of optical parametric amplification (OPA) is investigated. The general physical model for evaluating the phase-matching scheme capable of generating ultra-broad gain bandwidth is developed. Based on this model, the phase-matching configuration and the corresponding matching signal wavelength can be obtained only under the conditions of a given pump wavelength and nonlinear crystal parameters. Numerical simulations, taking β -BaB₂O₄ (BBO) crystal for example, are performed, and the results show that there is a extreme difference for the acceptance angles between two different non-collinear phase-matching configurations. Analysis and optimization of non-collinear phase matching parameters are also carried out in order to obtain maximum gain bandwidth and excellent crystal acceptance angle. The calculated results of spectral phase-matching range for OPA based on BBO crystal, can also provide a theoretical basis for the designs of multi-beam-pumped or multi-stage OPA systems.

Key words nonlinear optics; optical parametric amplification; gain bandwidth; phase matching; ultrafast laser technique

OCIS codes 190.4223; 190.4410; 190.4975; 190.7110; 320.7090

1 引 言

近年来光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)技术已经成为产生具有极高峰值功率的超短激光脉冲的有力工具。为了产生脉宽更短的超短超强激光脉冲,要求光参量放大器(OPA)输出的光谱宽度尽可能宽^[1-2],同时为了降低对 OPA 抽运源的光束质量要求,OPA 对抽运光的接收角也是需要考虑的一个重要因素^[3],而且在很多情况下最大带宽和最大接收角并不能同时达到。另外,为了输出更高的激光脉冲能量,需要选用更大口径的非线性光学晶体^[4],

例如,可以充分利用在激光惯性约束核聚变牵引下发展起来的钽玻璃激光技术,采用钽玻璃激光器的二次谐波(527 nm)作为 OPA 的抽运源,结合大口径非线性晶体磷酸二氢钾(KDP)和磷酸二氘钾(K^{*}DP),有望建成数十至数百拍瓦甚至艾瓦(10¹⁸ W)的超快超强激光器,其聚焦功率密度可达到 10²⁴~10²⁶ W/cm²。在给定抽运光波长和非线性晶体的情况下,如何选取信号光波长和 OPA 相位匹配结构,以便得到最大的增益带宽和接收角,又提出了一个新的研究课题。尽管关于光参量放大带宽

收稿日期: 2014-02-24; 收到修改稿日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(11247011)、河北科技大学博士科研启动基金

作者简介: 王艳海(1979—),男,博士,讲师,主要从事拍瓦超短脉冲激光技术方面的研究。

E-mail: wangyanhai@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的研究已经得到了广泛开展^[2-3,5-8],但是这些研究一般基于给定抽运光和信号光波长以及非线性晶体种类的情况,而且没有全面权衡考虑带宽和接收角的合理取舍等问题。

本文通过建立一组得到极大带宽和极佳晶体接收角的方程,采用牛顿迭代法求解该非线性方程组,得到了优化光参量放大相位匹配方案的一般方法。在给定抽运光波长和非线性晶体的条件下,利用该方法可以得出 OPA 极大带宽和极佳接收角的相位匹配参数和信号光匹配波长,计算了偏硼酸钡

(BBO)晶体非共线相位匹配两种结构的晶体接收角,发现了两种结构的接收角存在极大差异,并讨论了 OPA 的带宽和接收角的优化设计问题。

2 光参量放大的理论分析

OPA 非共线相位匹配结构有两种,如图 1 所示,这里 α 和 β 分别是抽运光和闲置光波矢量 \mathbf{k}_p 、 \mathbf{k}_i 与信号光波矢量 \mathbf{k}_s 之间的夹角,称 α 为非共线角,图中虚线为晶体光轴方向,当 $\alpha = 0$ 时,非共线结构就转化为共线相位匹配模式^[2, 6, 9-11]。

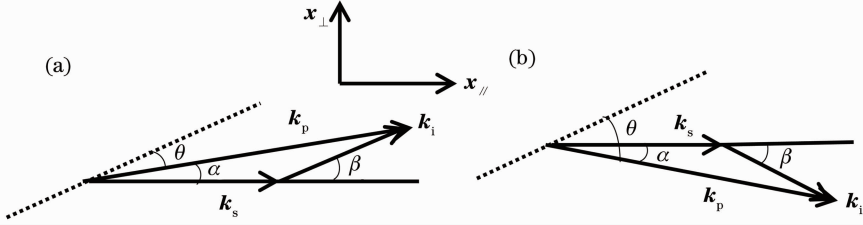


图 1 单轴晶体中参量放大非共线相位匹配的两种结构

Fig. 1 Two configurations of non-collinear phase matching for OPA process in uniaxial crystals

为了提高参量转换效率,三波混频光参量放大过程必须满足的能量守恒和波矢量的相位匹配条件为

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad (2)$$

式中 ω 为角频率, \mathbf{k} 为波矢量,下标 p,s 和 i 分别代表抽运光、信号光和闲置光,见图 1。OPA 的增益和转换效率取决于相位失配量:

$$\Delta\varphi = \Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = (\mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{r} 为位置矢量。当达到完全相位匹配($\Delta\mathbf{k} = 0$)时,OPA 转换效率最高,这可以通过改变抽运光(e光)与光轴的夹角 θ (相位匹配角)和非共线角 α 实现。但这只是针对信号光特定波长的,对应的波长称为相位匹配波长,信号光其它波长处 $\Delta\mathbf{k} \neq 0$,但是可以通过优化相位匹配结构,使得在匹配波长两侧有限光谱范围内 $\Delta\mathbf{k}$ 仍然较小,这些波长仍然能够获得较高的增益。波矢量相位失配 $\Delta\mathbf{k}$ 可以沿平行于和垂直于信号光波矢量 $\mathbf{x}_{//}$ 、 \mathbf{x}_{\perp} 方向分解成下面两个分量:

$$\Delta k_{//} = k_p \cos \alpha - k_s - k_i \cos \beta = 0, \quad (4)$$

$$\Delta k_{\perp} = k_p \sin \alpha - k_i \sin \beta = 0, \quad (5)$$

式中 $k_z = |\mathbf{k}_z|$ ($z = p, s, i$)。

相位失配量 $|\Delta\mathbf{k}|$ 主要取决于平行信号光波矢量方向的失配量 $\Delta k_{//}$,现在改写为 Δk 。 Δk 随信号光频率变化得越缓慢,则 OPA 相位匹配带宽也就越大。将 Δk 在信号光相位匹配频率处泰勒近似展开,可表示为

$$\Delta k = \Delta k_0 + \frac{\partial(\Delta k)}{\partial \omega_s} \Delta \omega_s + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\Delta k)}{\partial \omega_s^2} (\Delta \omega_s)^2 + \frac{1}{3} \frac{\partial^3(\Delta k)}{\partial \omega_s^3} (\Delta \omega_s)^3 + \dots, \quad (6)$$

式中 $\Delta\omega = \omega - \omega_s$ 为信号光频率偏离匹配频率 ω_s 的量。当(6)中的一阶项和二阶项同时消失时,将获得极大的增益带宽。当一阶项等于零时,可以把(4)式和(5)式对信号光频率求导得到

$$\Delta k_{//} \cong -\frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} \Delta \omega + \frac{\partial k_i}{\partial \omega_i} \cos \beta \Delta \omega - k_i \sin \beta \frac{\partial \beta}{\partial \omega_i} \Delta \omega, \quad (7)$$

$$\Delta k_{\perp} \cong \frac{\partial k_i}{\partial \omega_i} \sin \beta \Delta \omega + k_i \cos \beta \frac{\partial \beta}{\partial \omega_i} \Delta \omega.$$

整理(7)式可以得到

$$\frac{\partial k_i}{\partial \omega_i} - \cos \beta \frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} = 0, \quad v_{gs} = v_{gi} \cos \beta. \quad (8)$$

(8)式表明,闲置光的群速度 v_{gi} 在信号光波矢量方向上的分量和信号光群速度 v_{gs} 相等是取得极大增益带宽的一个必要条件。为了得到更大的增益带宽,须使得相位失配 Δk 泰勒近似展开公式中的二阶项等于零,即把(7)式对信号光频率再次微分,并整理可以得到

$$\frac{\partial^2 k_s}{\partial \omega_s^2} \cos \beta + \frac{\partial^2 k_i}{\partial \omega_i^2} - \frac{\tan^2 \beta}{v_{gi}^2 k_i} = 0. \quad (9)$$

(1)、(4)、(5)、(8)、(9)式组成一个待求解的方程组,共有 5 个未知量:信号光匹配波长 λ_c 、闲置光匹配波长 λ_0 、 θ 、 α 和 β 。当抽运光的波长和非线性晶体的 Sellmeier 方程已知时,采用牛顿迭代法原理数值求解

方程组,可以求出满足 OPA 极大输出带宽和极佳接收角的工作条件。但需要注意的是,这组解并不是取得最大增益带宽的方案,而是极大带宽和极大接收角的综合平衡方案。假定 OPA 处于小信号放大状态,解出这组解后,代入小信号增益系数(6)式,即可计算出参量放大器的增益带宽随晶体接收角的变化规律,可以据此对光参量放大带宽和接收角进行合理取舍,对 OPA 相位匹配结构参数进行优化设计。

3 增益带宽和接收角的计算

以 I 类相位匹配 BBO 晶体为例,计算相位匹配结构和参数对增益带宽和晶体接收角的影响,综合考虑增益带宽和晶体对抽运光的接收角,对宽带参

量放大进行优化设计。计算中取 BBO 晶体长度为 4.5 mm,抽运光波长为 527 nm,强度为 4 GW/cm²。在上述晶体参数和抽运光波长给定的条件下,取得极大带宽的相位匹配参数见表 1(其中 COPA 为共线相位匹配,NOPA 为非共线相位匹配, d_{eff} 为非线性晶体的有效非线性系数, $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gain}}$ 为半极大增益带宽),增益光谱分布如图 2 所示,有三种取得极大带宽的相位匹配工作条件。由图 2 可以看出三种不同 OPA 相位匹配结构的增益谱相互重叠,尤其是匹配波长为 820 nm 和 930 nm 的相位匹配角和非共线角都很接近,利用这一结论可以采用双光束沿不同匹配角抽运来获得超宽的增益带宽^[12-13]。

表 1 BBO 晶体的 I 类相位匹配的参量放大特性

Table 1 Characteristics of the type-I parametric amplification processes in BBO crystal

Parametric process	λ_p/nm	λ_s/nm	λ_i/nm	$\theta/(\text{^\circ})$	$\alpha/(\text{^\circ})$	$\beta/(\text{^\circ})$	$d_{\text{eff}}/(\text{pm/V})$	$\Delta\lambda_{\text{FWHM}}^{\text{Gain}}/\text{nm}$
COPA	527	1054	1054	22.96	0	0	0.230	178
NOPA- I	527	820	1475	24.09	2.46	6.92	0.228	210
NOPA- II	527	930	1218	23.74	2.12	4.9	0.228	172

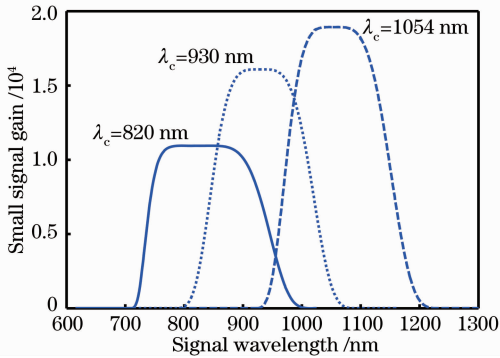


图 2 BBO 晶体中 I 类相位匹配参量放大的增益光谱
Fig. 2 Gain spectra of the type-I OPA in BBO crystal

3.1 两种非共线相位匹配结构的接收角对比

以非共线匹配波长 820 nm 为例,来说明非共线相位匹配结构对晶体接收角的影响。图 3 给出了相位匹配结构对抽运光接收角的影响。图 4 为不同相位匹配结构时信号光增益随抽运光相位匹配角偏离量的分布。图 5 为信号光随抽运光相位匹配角偏移变化的增益谱分布。当抽运光相位匹配角改变 $\delta\theta$ 时,非共线角 α 的改变量为 $\delta\alpha = -\delta\theta$ 。晶体对抽运光的接收角为 1 mrad,见图 3(a)和图 4 中的点划线。当固定非共线角 α 时,接收角为 2.4 mrad,见图 3(b)和图 4 中的点线,很多文献中的接收角都是这样计

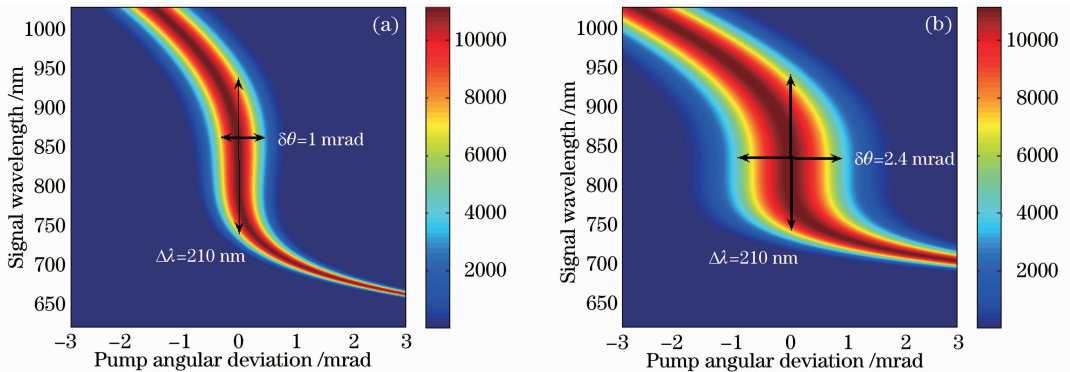


图 3 非共线相位匹配结构对抽运光接收角的影响。(a)信号光波矢量与晶体光轴夹角为 $\theta + \alpha$; (b)信号光与抽运光波矢量夹角固定为 α

Fig. 3 Effect of noncollinear-phase-matching configurations on the angular tolerance for pump. (a) Signal wave vector is at an angle $\theta + \alpha$ relative to the direction of the optical axis; (b) signal wave vector is at a constant angle α relative to the direction of the pump

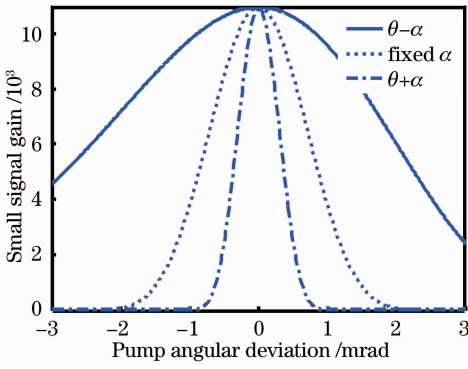


图 4 信号光增益随抽运光相位匹配角偏离量的分布
Fig. 4 Variances of signal gain distributions due to pump angular deviation from the perfect phase-matching angle

算的^[14-15],但实际上无法保持非共线角不变,因此这样计算出来的接收角与实际情况偏差较大,本文的计算结果就证明了这一点,两种方法计算出来的非共线角相差 1.4 mrad。当非共线相位匹配结构为图 1(b)所示时,信号光波矢量与晶体光轴的夹角为 $\theta-\alpha$,抽运光相位匹配角的偏移导致非共线角同样的偏移量 $\delta\alpha=+\delta\theta$,晶体对抽运光的接收角见图 4 中的实线与图 5,接收角可以很大(大于 4 mrad),按文献[3,14]中的公式来计算,接收角约为 10 mrad。

两种非共线相位匹配方案导致的晶体接收角的这种巨大差异,这在宽带 OPA 的设计中是必须考虑的一个问题。尤其是当抽运光光斑较小,发散角较大时,根据文献[2]中所讨论的为了补偿走离效应,应采用图 1(a)结构,当晶体长度比较短时,晶体接收角有限导致的参量增益降低可能还比较小,但晶体长度较长时,就必须综合考虑走离效应和晶体接收角的影响。此外,当参量作用光波的光斑较大时,走离效应的影响可以忽略,由于大口径晶体比如

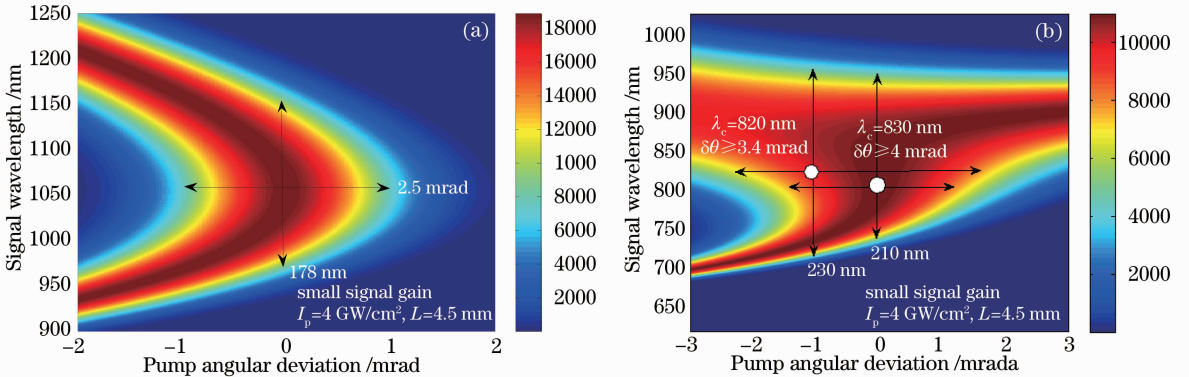


图 5 随抽运光相位匹配角偏移变化的增益谱分布。(a)信号光匹配波长为 1054 nm; (b)信号光匹配波长为 820 nm
Fig. 5 Gain spectra as a function of pump phase-matching angle deviation. (a) Signal phase-matching wavelength: 1054 nm; (b) signal phase-matching wavelength: 820 nm

KDP 和 K^*DP 晶体的非线性系数较小,为了提高转换效率必须增加晶体长度,导致晶体的接收角变得很小,此时采用图 1(b)中的非共线结构,可以克服晶体接收角过小的困难,以便保证光参量放大的高转换效率。

3.2 增益带宽

本节的讨论除了共线相位匹配外,都是基于图 1(b)中的非共线结构。当采用共线相位匹配结构时,OPA 在简并放大模式下有相当大的增益带宽,相位匹配角为 22.96° ,增益带宽为 178 nm。随抽运光角偏移而变化的增益谱分布如图 5(a)所示,晶体对抽运光的接收角约为 2.5 mrad。由于在这种工作条件下的 OPA 的接收角较大,在设计实际的参量放大系统时,如果抽运光的光斑不是太小,光束质量也不是太差的情况下,结合增益分布,可以适当减小抽运光相位匹配角,以便取得最大的增益带宽。综合考虑增益带宽和接收角,对比图 6(a)、(b)、(c)和(d)可以看出,图 6(b)的参数为最佳工作条件,此时相位匹配角为 22.94° ,带宽为 200 nm。

当匹配波长为 820 nm、非共线匹配角为 2.46° 和抽运光相位匹配角为 24.09° 时,增益带宽达到极大值(210 nm),中心波长为 830 nm。随抽运光角偏移的增益谱分布见图 5(b)所示,从图中可以看出此工作条件下晶体对抽运光的接收角相当大(大于 4 mrad),这说明即使抽运光发散角较大,仍然可以取得较高的参量增益。基于和上段同样的考虑,对比图 6(e)、(f)、(g)和(h),可以选择图 6(e)的工作参数,此时为最佳工作条件,此时增益带宽为 230 nm,中心波长为 820 nm 抽运光相位匹配角为 24.03° ,非共线角夹角为 2.40° ,参看图 5(b),此时晶体对抽运光的接收角大于 3.4 mrad。

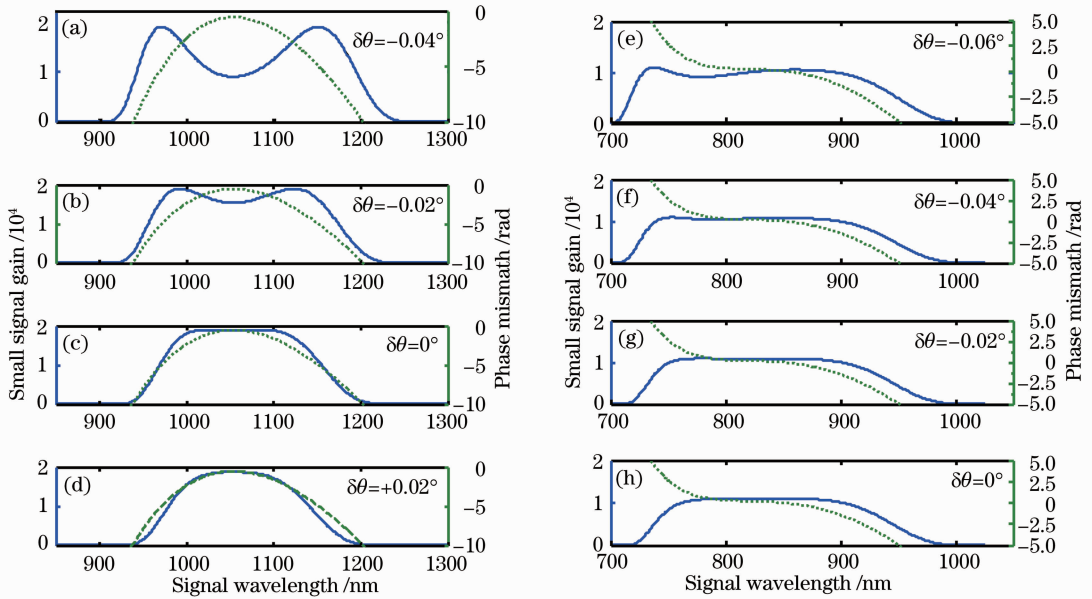


图6 增益谱(实线)和光谱相位失配量(虚线)随抽运光偏移角的变化。(a)、(b)、(c)和(d)对应相位匹配波长为1054 nm；(e)、(f)、(g)和(h)对应相位匹配波长为820 nm

Fig. 6 Calculated gain spectra (solid) and spectral-phase mismatches (dashed) with different pump angular deviations. (a), (b), (c) and (d) corresponding to 1054 nm phase-matching; (e), (f), (g) and (h) corresponding to 820 nm phase-matching

4 结 论

讨论了一般的三波混频光参量放大过程的相位匹配问题,在给定抽运光波长和非线性晶体的条件下,通过求解 OPA 相位匹配方程组,能够得到满足极大增益带宽和极佳晶体接收角的不同相位匹配方案。通过数值计算,发现了两种不同非共线相位匹配结构的晶体接收角的巨大差别,这种差别对 OPA 设计极为重要。在获得足够大的晶体接收角的条件下,通过优化相位匹配角和非共线角,可以得到最大的带宽。在波长为 527 nm 的抽运光的作用下,4.5 mm 长度的 BBO 可以得到带宽为 230 nm 和晶体接收角大于 3.4 mrad 的工作条件,计算结果可以很方便地应用到实验中。该分析方法不仅适用于单轴晶体和 I 类相位匹配,而且适用于双轴晶体和 II 类相位匹配,计算结果也可以对多光束抽运 OPA 进行分析,以获取最大带宽。

参 考 文 献

- Dubietis A, Butkus R, Piskarskas A P. Trends in chirped pulse optical parametric amplification[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2006, 12(2): 163–172.
- Schimpf D N, Rothhardt J, Limpert J, *et al.*. Theoretical analysis of the gain bandwidth for noncollinear parametric amplification of ultrafast pulses[J]. J Opt Soc Am B, 2007, 24(11): 2837–2846.

- Ross I N, Matousek P, New G H C, *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification[J]. J Opt Soc Am B, 2002, 19(12): 2945–2956.
- Wang Nannan, Sun Meizhi, Xu Tingting, *et al.*. Analysis of optical parametric chirped pulse amplification spectrum and conversion efficiency resulting from time characteristics of signal pulse based on YCOB crystal[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502013.
王楠楠, 孙美智, 徐婷婷, 等. 基于 YCOB 晶体分析信号光脉冲时间特性对光参变啁啾脉冲放大光谱和转换效率的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 502013.
- 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.
- Cerullo G, Silvestri S D. Ultrafast optical parametric amplifiers[J]. Rev Scient Instrum, 2003, 74(1): 1–18.
- Lozhkarev V, Freidman G, Ginzburg V, *et al.*. Study of broadband optical parametric chirped pulse amplification in a DKDP crystal pumped by the second harmonic of a Nd:YLF laser[J]. Laser Phys, 2005, 15(9): 1319.
- Chen Changshui, Wei Junxiang, Liu Songhao. Mid-infrared laser linewidth analysis based on difference frequency generation[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021404.
陈长水, 韦俊雄, 刘颂豪. 差频产生中红外光源的线宽分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021404.
- Dabu R. Very broad gain bandwidth parametric amplification in nonlinear crystals at critical wavelength degeneracy[J]. Opt Express, 2010, 18(11): 11689–11699.
- Witte S, Eikema K S. Ultrafast optical parametric chirped-pulse amplification[J]. IEEE J Sel Top Quant Electron, 2012, 18(1): 296–307.
- Liu Tao, Jia Huibin, Xiang Hongyin, *et al.*. Bandwidth

- investigation of optical parametric amplifier in different noncollinear geometries[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502011.
- 刘 涛, 贾惠彬, 项洪印, 等. 基于不同非共线结构的光参量放大器的带宽特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0502011.
- 12 Herrmann D, Tautz R, Tavella F, *et al.*. Investigation of two-beam-pumped noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification for the generation of few-cycle light pulses[J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4170–4183.
- 13 Žeromskis E, Dubietis A, Tamošauskas G, *et al.*. Gain bandwidth broadening of the continuum-seeded optical parametric amplifier by use of two pump beams[J]. *Opt Commun*, 2002, 203(3): 435–440.
- 14 Yao J Q, Sheng W D, Shi W Q. Accurate calculation of the optimum phase-matching parameters in 3-wave interactions with biaxial nonlinear-optical crystals[J]. *J Opt Soc Am B*, 1992, 9(6): 891–902.
- 15 Liu Hongjun, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al.*. Study of noncollinearly phase-matched LiB_3O_5 femtosecond optical parametric amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(10): 1195–1201.
- 刘红军, 陈国夫, 赵 卫, 等. 非共线相位匹配 LBO 晶体飞秒光参变放大器的研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(10): 1195–1201.

栏目编辑: 史 敏