

非共线角与相位匹配角对 YCOB 晶体 OPCPA 增益光谱影响的研究

马林^{1,2} 於亮红¹ 徐露¹ 储玉喜¹ 梁晓燕¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 主要通过理论和实验研究相位匹配角和非共线角对三硼酸钙钇(YCOB)晶体光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)的放大光谱产生的影响。理论上,通过数值模拟计算发现,基于YCOB-OPCPA的放大光谱对相位匹配角和非共线角的变化均比较敏感,当相位匹配角或非共线角有微小变化时,增益光谱将会出现中心波段漂移和窄化现象,但当非共线角在 $2.80^\circ \sim 2.91^\circ$ 之间变化时,总能找到一个理想的相位匹配角与之匹配,满足带宽大于80 nm的宽带OPCPA放大。为了获得高效率宽带OPCPA放大输出,提出一种基于高精度CCD的非共线角的测量方法,并利用该方法在实验中研究了不同非共线角下YCOB晶体OPCPA的光谱增益特性,并获得宽带放大光谱,为单次OPCPA调试实验提供参考。

关键词 超快光学; 三硼酸钙钇晶体; 光参量啁啾脉冲放大; 非共线角; 相位匹配

中图分类号 O437.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0815001

Influence of Non-Collinear Angle and Phase Matching Angle on YCOB-OPCPA Gain Spectra

Ma Lin^{1,2} Yu Lianghong¹ Xu Lu¹ Chu Yuxi¹ Liang Xiaoyan¹

(¹ State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Theoretical and experimental investigations are carried out to determine the influence of the phase matching angle and non-collinear angle on the optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) amplified spectrum of yttrium calcium oxyborate (YCOB) crystal. In theory, through the numerical simulation calculation, it is found that the amplified spectrum of YCOB-OPCPA is sensitive to the phase matching angle and non-collinear angle. When the phase matching angle or non-collinear angle is changed even in a small range, center wavelength drifting and narrowing phenomenon will occur in the gain spectrum. However, when the non-collinear angle is between 2.80° and 2.91° , there is always a phase matching angle that can match the non-collinear angle to satisfy the OPCPA output of more than 80 nm broadband with high power. With the purpose of getting high efficiency and broadband OPCPA output, a method to measure the non-collinear angle accurately based on high accurate CCD is proposed. With this method, the YCOB-OPCPA gain spectrum characteristics based on different non-collinear angles are researched, and the broadband OPCPA gain spectrum is acquired. The experimental results can provide a reference for single-shot pulse OPCPA experiments.

Key words ultrafast optics; yttrium calcium oxyborate crystal; optical parametric chirped pulse amplification; non-collinear angle; phase matching

OCIS codes 320.7090; 320.7150

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61378030)

作者简介: 马林(1989—),男,硕士研究生,主要从事超短高能激光放大方面的研究。E-mail: maxy@siom.ac.cn

导师简介: 梁晓燕(1967—),女,博士生导师,主要从事超短高能激光技术和固体激光器等方面的研究。

E-mail: liangxy@siom.ac.cn

1 引言

啁啾脉冲放大(CPA)和光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)是实现超强超快激光放大的两种主要技术手段^[1-2]。目前很多国家和实验室都建有太瓦级(TW)甚至拍瓦级(PW)激光系统,这些超强超短激光放大系统大部分是利用 CPA 技术实现的^[3-4]。但是随着 CPA 技术的发展,高能量放大需要大口径的钛宝石晶体,而且大口径钛宝石晶体会在放大过程中产生很强的横向寄生振荡(ASE)以及增益窄化效应,大大降低了 CPA 作为高能量放大技术的优势^[5]。OPCPA 技术作为另一种超短高能激光放大技术越来越受到人们的关注。该技术在 1992 年由 Dubietis 等^[1]首次提出,经过几十年的发展已被成熟地运用于超短高能激光系统中。OPCPA 和 CPA 相比具有如下特点:单程增益高、可调谐范围大、增益带宽宽、热效应较好、B 积分较小、放大信号性噪比高等。2006 年,英国 Rutherford Appleton 实验室利用两级 LBO 作为前端放大器,在 527 nm 激光抽运下输出 35 J 的宽带激光脉冲^[6];2007 年,俄罗斯应用物理研究所利用三级 DKDP 作为 OPCPA 放大器,在 527 nm 抽运下,输出 0.56 PW/43 fs 超短激光脉冲^[7];2007 年,中国科学院上海光学精密机械研究所在 CPA 和 OPCPA 混合式放大技术基础上,利用 $\Phi 80$ mm 口径的 LBO 晶体实现 0.61 PW 的超高峰值功率高能激光输出^[8]。

与 CPA 采用钛宝石作为放大介质不同,OPCPA 使用非线性晶体作为放大介质,因此不会产生 ASE 和增益窄化效应。目前作为 OPCPA 实验中使用的非线性晶体主要包括 KDP、DKDP、LBO、BBO 和 YCOB 等,其中 KDP 和 DKDP 晶体能生成较大的口径,但是它们的有效非线性系数较小且易潮解^[9];BBO 晶体虽然具有较高的有效非线性系数,但是受到工艺的限制,难以获得大口径^[10];LBO 晶体尺寸能够做得比较大,也开始应用于高能激光放大中。近年来,YCOB 晶体引起较多的关注,由于 YCOB 晶体具有生长速度快、不易潮解、有效非线性系数大、光损伤阈值高等优点,同时具有良好的机械性能和光热性质,可应用于具有一定重复频率的高能高功率激光放大系统中,最重要的是 YCOB 晶体很容易生长出较大口径的晶体^[11],因此,YCOB 晶体未来有可能被广泛应用于大口径激光倍频,光参量放大(OPA)和 OPCPA 中,特别是很有潜质作为超高功

率高能激光主放大的非线性介质^[12]。

在基于 YCOB 晶体的 527 nm 抽运 800 nm OPCPA 实验中,为了实现宽带增益,一般采用非共线 OPCPA 结构^[13]。在非共线 OPCPA 中,相位匹配角和非共线角是关键参数,对光谱增益影响很大。本文主要通过理论和实验来研究在 527 nm 抽运 800 nm 宽带 OPCPA 实验中,非共线角对放大光谱的影响规律,并通过精密 CCD 测量角度的方法来精密测量控制非共线角,解决大能量单次 OPCPA 放大中的非共线角度调节技术难题,为基于高能 OPCPA 方案的高能拍瓦激光系统提供理论和技术支撑。

2 理论分析

1996 年,法国科学院 Aka 等^[14]发明了一种新晶体,YCOB 晶体,它的化学式为 $YCa_4O(BO_3)_3$ 。YCOB 晶体是双轴单斜晶体,空间结构为非中心对称的 C_m 点群,该晶体具有优越的非线性光学性能、高温压电性能以及良好的化学稳定性。YCOB 晶体可采用提拉法生长,生长周期短,成本低,有利于获得可制作大口径激光器件的晶体,可实现高能量和高功率激光系统的倍频(SHG)、三倍频(THG)、光参量振荡以及 OPCPA。本研究中使用的是中国科学院硅酸盐研究所生长的直径为 4 inch(1 inch = 2.54 cm)的 YCOB 晶体。

2.1 YCOB 的非线性光学性质

通过对 YCOB 晶体主轴折射率进行测试,可以得到主轴的折射率公式(Sellmeier 方程)为

$$\begin{cases} x \text{ 轴: } n_x^2 = 2.76254 + \frac{0.0221}{\lambda^2 - 0.01226} - 0.00101\lambda^2 \\ y \text{ 轴: } n_y^2 = 2.87289 + \frac{0.02227}{\lambda^2 - 0.01858} - 0.00972\lambda^2, \\ z \text{ 轴: } n_z^2 = 2.90467 + \frac{0.02402}{\lambda^2 - 0.01357} - 0.00818\lambda^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长,单位为 μm 。

在非线性光学过程中,有效非线性光学系数 d_{eff} 是一个非常重要的物理量,一般来说,希望 d_{eff} 越大越好。YCOB 晶体在不同匹配方式和不同主平面下的 d_{eff} 如表 1 所示。其中 θ 为波矢与 z 轴夹角, ϕ 为波矢在 xoy 平面内的投影与 x 轴的夹角,* 表示在 zox 主平面内进行计算和模拟。

表 1 YCOB 晶体主平面内有效非线性光学系数 d_{eff}
 Table 1 Optical effective non collinear coefficient d_{eff} of YCOB crystal principal plane

Main plane	Type I	Type II
yoz	$d_{13} \sin^2 \theta + d_{12} \cos^2 \theta$	$d_{31} \sin \theta$
	$d_{12} \cos \theta - d_{32} \sin \theta$ ($0^\circ \leq \theta < \Omega$, $\phi = 0^\circ$)	0 ($0^\circ \leq \theta < \Omega$)
zox^*	$d_{12} \cos \theta + d_{32} \sin \theta$ ($0^\circ \leq \theta < \Omega$, $\phi = 180^\circ$)	$d_{32} \sin \theta - d_{12} \cos \theta$ ($\Omega < \theta \leq 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$)
	($\Omega < \theta \leq 90^\circ$)	$d_{32} \sin \theta + d_{12} \cos \theta$ ($\Omega < \theta \leq 90^\circ$, $\phi = 180^\circ$)
xoy	$d_{13} \sin \phi$	$d_{31} \sin^2 \phi + d_{32} \cos^2 \phi$

根据三波耦合方程,可以计算出 YCOB 晶体的 zox 平面能够支持 800 nm 宽带 OPCPA 放大,而且这个主平面内的有效非线性系数最大,所以后面的理论计算和实验都是基于 YCOB 晶体 zox 平面进行的。值得注意的是,在 zox 平面内,YCOB 晶体的有效非线性系数与空间相位角 ϕ 有关,由于波矢投影在 xoy 平面内与 x 轴的夹角 ϕ 有两个表达式,分

别为 $\phi=0^\circ$ 和 $\phi=180^\circ$,通过程序计算,当 $\phi=180^\circ$ 时,有效非线性系数最大。在选择晶体切割角度时,为了得到较大的有效非线性系数 d_{eff} , ϕ 选择 180° 。

2.2 三波耦合方程

OPCPA 是一个二阶非线性过程,抽运光(p)、信号光(s)和闲频光(i)在晶体内的光场变化遵守的三波耦合方程组^[15]为

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{1}{v_{gs}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_s(z) = \frac{i2\pi\omega_s^2}{k_s c^2} \chi^{(2)} E_p(z) E_i^*(z) \exp(-iz\Delta k) \\ \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{1}{v_{gi}} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_i(z) = \frac{i2\pi\omega_i^2}{k_i c^2} \chi^{(2)} E_p(z) E_s^*(z) \exp(-iz\Delta k) \\ \left(\frac{\partial}{\partial Z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_p(z) = \frac{i2\pi\omega_p^2}{k_p c^2} \chi^{(2)} E_s(z) E_i(z) \exp(iz\Delta k) \end{cases} \quad (2)$$

(2)式描述了信号光、闲频光、抽运光之间的能量转换过程,其中 c 、 E 、 k 、 ω 分别代表真空中的光速、电场强度、波矢、光波频率, Z 为光场传播方向, $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 为相位失配因子,当 $\Delta k = 0$ 时,表明三波耦合满足相位匹配条件。在 OPCPA 过程中,注入的抽运光远比信号光要强,三波在晶体内传播过程中,能量主要从抽运光转换至信号光,使信号光得到放大。

2.3 宽带非共线 YCOB-OPCPA 放大理论模拟

当信号光的强度与初始抽运光的强度相差不大时($I_p/I_s < 1000$),随着 OPCPA 过程的发展,信号光和闲频光能量不断被放大,而抽运光能量却被大量损耗,而且能量损耗不能被忽略,故不能采用小信号增益来计算三波耦合过程。为了了解较高转换效率下的光学参量放大特性,需要求解三波耦合方程组(2)式。

(2)式不能直接求解解析解,只能进行数值求解。采用分步傅里叶算法和变步长 Runge-Kutta 算法对基于 YCOB 晶体的 OPCPA 过程进行三波耦合方程的求解,以此来数值拟合参量放大过程。其中,YCOB 晶体选择 zox 平面为主平面,因为在该面上能够发生宽带 OPCPA 并且具有最大的有效非线

性系数。对于非共线参量过程,不同的非共线角对应不同的相位匹配角。在计算过程中,连续改变非共线角求出其对应的相位匹配角和有效非线性系数,再逐点计算每一对非共线角和相位匹配角对应的宽带增益,以获得最大的宽带为目的来优化角度。

优化结果表明,当抽运光与信号光之间的非共线角为 2.85° ,相位匹配角 $\theta=26.47^\circ$, $\phi=180^\circ$ 时,有效非线性系数为 $d_{\text{eff}}=1.34$ pm/V,参量放大过程有最宽的增益带宽和最高的增益。图 1 为 YCOB 晶体在上述条件下模拟出的增益谱线,横坐标为波长,纵坐标为增益。在计算中,注入的抽运光强度为 0.5 GW/cm²,注入的信号光强度为 2 MW/cm²,晶体长度为 20 mm。从图 1 中可以看出增益谱线的中心波段在 820 nm 附近,半峰全宽增益带宽覆盖 $750\sim 880$ nm,共 130 nm 的宽带范围,满足 (800 ± 50) nm 宽带放大。

由图 1 可以知道,当非共线角为 $\alpha=2.85^\circ$,相位匹配角为 $\theta=26.47^\circ$, $\phi=180^\circ$ 时,非线性增益光谱最宽,放大带宽为 130 nm。在非共线 OPCPA 中,相位匹配角和非共线角是两个比较重要的参数,它们决定了 OPCPA 放大光谱的中心波段和光谱宽度,为了获得较宽的光谱,必须要精确地控制相位匹配

角和非共线角。在实验中,相位匹配角度不仅和入射光的方向有关,而且和晶体的光轴有关,比较难以实现精确的测量;而非共线角则是抽运光和信号光的夹角,可以精确测量。当测量到精确的非共线角后,就可以通过改变非线性晶体的角度来改变相位匹配角,寻找合适的相位匹配角,从而获得最大的增益带宽。

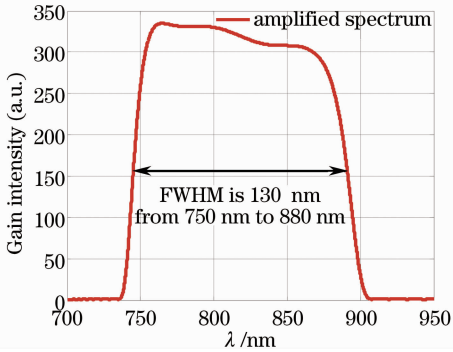


图1 非共线角为 $\alpha=2.85^\circ$,相位匹配角为 $\theta=26.47^\circ$, $\phi=180^\circ$ 时,YCOB晶体I类相位匹配800 nm附近OPCPA理想增益谱线

Fig. 1 Simulated ideal gain spectrum near 800 nm of YCOB-OPCPA at type I phase matching with non-collinear angle $\alpha=2.85^\circ$ and phase matching angles $\theta=26.47^\circ$, $\phi=180^\circ$

为了了解非共线角和相位匹配角对YCOB-OPCPA放大光谱的影响,分别在同一相位匹配角下,计算不同非共线角对放大光谱的影响,在同一非共线角下,计算不同相位匹配角对放大光谱的影响。

当相位匹配角固定为 26.47° 时,其对应的理想非共线角为 2.85° ,增益带宽最大。当相位匹配角 $\theta=26.47^\circ$ 时,YCOB晶体的增益谱线随着非共线角的变化而变化,如图2所示。对应的理想非共线角

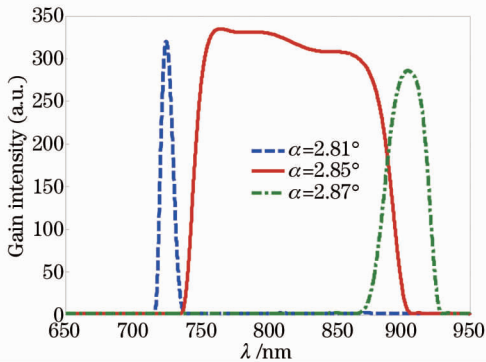


图2 相位匹配角固定为 26.47° ,不同的非共线角对应的增益谱线

Fig. 2 Different gain spectra of YCOB-OPCPA with different non-collinear angles when phase matching angle is fixed at 26.47°

为 $\alpha=2.85^\circ$,此时放大光谱最宽,如图2中实线所示;当非共线角 $\alpha=2.81^\circ$ 时,增益光谱中心波段向短波段发生严重偏移,为720 nm左右,并且光谱带宽窄化较为严重,如图2中虚线所示;当非共线角为 $\alpha=2.87^\circ$ 时,增益光谱中心波段向长波方向偏移,同时增益窄化效应也较为严重。从计算结果来看,YCOB-OPCPA的增益谱线对非共线角非常敏感,当非共线角偏离值大于 0.02° 时,将会导致增益谱线蓝移和红移并且都出现光谱窄化现象。

为了研究相位匹配角对OPCPA放大光谱的影响,计算了非共线角固定为 2.85° 时,相位匹配角在一定范围内变化对YCOB晶体增益谱线的影响,如图3所示。实线为理想相位匹配角和理想非共线角下的增益光谱带宽,此时增益光谱带宽最宽。当相位匹配角 $\theta=26.4^\circ$ 时,增益光谱中心波段蓝移为735 nm,光谱严重窄化,如图3虚线所示;当相位匹配角 $\theta=26.6^\circ$ 时,增益光谱中心波段红移为945 nm,光谱同样出现严重窄化现象。

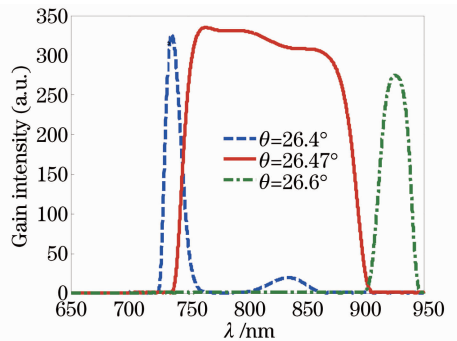


图3 非共线角固定为 2.85° ,不同的相位匹配角对应的增益谱线关系

Fig. 3 Different gain spectra of YCOB-OPCPA with different phase matching angles when non-collinear angle is fixed at 2.85°

由图2和图3和上述分析可知,YCOB晶体对非共线角和相位匹配角都很敏感,当一个角度固定不变,另外一个角度有微小的偏差,将会导致放大光谱产生严重窄化以及中心波段漂移,不能支持在800 nm附近的宽带放大。在实际的实验中,采用的方法是先精确测量非共线角,再调节晶体选择合适的相位匹配角来实现宽带光谱放大。由上面的程序计算,当相位匹配角 $\theta=26.47^\circ$ 时,非共线角 α 必须严格等于 2.85° 才能实现宽带脉冲放大。由于测量和角度调节误差,在实验中测量到的非共线角只是接近 2.85° ,很难做到非共线角的精确确定。但是当非共线角为一定角度时,可以通过调节晶体选择在这个非共线角度下的最优化的相位匹配角来匹

配,实现高增益宽带放大。

由前面的计算可知,当非共线角 $\alpha=2.85^\circ$ 时,其对应的最佳相位匹配角为 $\theta=26.47^\circ$ 。通过程序计算,当非共线角分别为 2.78° 、 2.83° 、 2.85° 、 2.95° 时,其最优化相位匹配角分别为 26.8° 、 26.56° 、 26.47° 、 25.97° ,所对应的增益谱线如图 4 所示。当 YCOB 晶体的非共线角减小时,其对应的最佳相位匹配角增大;非共线角增大,则对应的相位匹配角减小。当 $\alpha=2.78^\circ$, $\theta=26.8^\circ$ 时,增益谱线如图 4 中点线所示,虽然光谱全宽为 $720\sim 940\text{ nm}$,但是在 750 nm 和 860 nm 附近出现凹陷,影响宽带 OPCPA 放大;当 $\alpha=2.95^\circ$, $\theta=25.97^\circ$ 时,增益光谱如图 4 中

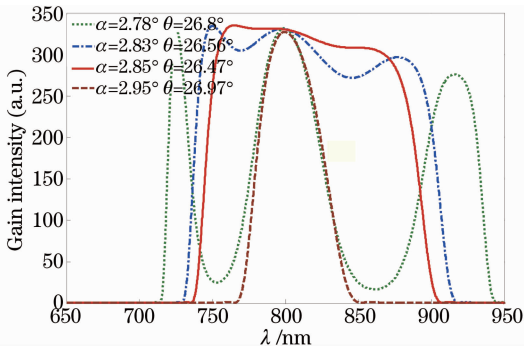


图 4 YCOB 晶体 I 类相位匹配下,不同的非共线角对应最优化相位匹配角时的增益谱线

Fig. 4 Simulated gain spectra of YCOB-OPCPA based on different non-collinear angles corresponding to optimum phase matching angles at type I phase matching

虚线所示,光谱中心在 800 nm 附近,光谱全宽为 $770\sim 845\text{ nm}$,半宽为 50 nm ,相比最理想的情况光谱出现窄化现象。点划线为 $\alpha=2.83^\circ$, $\theta=26.56^\circ$ 时的增益光谱曲线,增益带宽较宽,全宽范围为 $730\sim 910\text{ nm}$,光谱全宽为 180 nm ,也能支持宽带啁啾脉冲放大。经过计算发现,当非共线角在 $2.8^\circ\sim 2.91^\circ$ 之间,总有理想的相位匹配角与之匹配,满足宽带为 80 nm 的宽带 OPCPA 放大。

综合上面的分析与讨论,发现 YCOB 晶体对非共线角和相位匹配角度的变化非常敏感,当一个角度不变,另外一个角度发生微小变化时都会导致光谱发生改变。但是,当非共线角在 $2.80^\circ\sim 2.91^\circ$ 很小范围内变化时,能够找到一个相位匹配角与之理想匹配,满足带宽为 80 nm 左右的宽带啁啾脉冲放大。当非共线角小于 2.80° 或大于 2.91° 时,找不到合适的相位匹配角,使之满足带宽大于 80 nm 宽带 OPCPA 放大。为了能够实现宽带 OPCPA,首先要保证非共线角度在 $2.80^\circ\sim 2.91^\circ$ 之间,然后在这个范围内调节晶体角度,寻找合适的相位匹配角满足宽带 OPCPA 放大。

3 基于高精密 CCD 的非共线角精确测量方法

基于上述分析可以知道,在 OPCPA 调节过程中,最为关键的就是要确定非共线角度在 $2.80^\circ\sim 2.91^\circ$ 之间,为此提出一种基于精密 CCD 的非共线角度比较精确的测量方法,测量原理如图 5 所示。

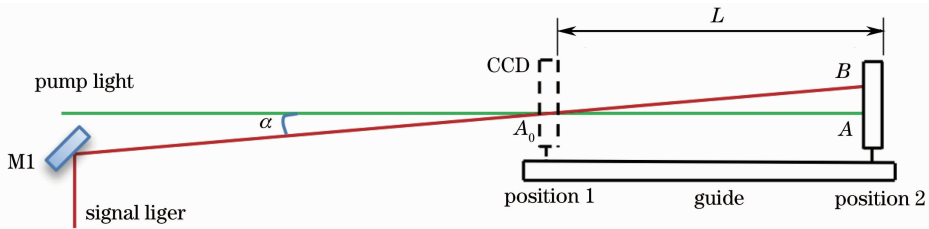


图 5 精确测量非共线角实验装置示意图

Fig. 5 Diagram of the experimental unit measuring non-collinear angle accurately

M1 为固定在精密调节平台上的反射镜,信号光经 M1 反射镜反射后与抽运光在位置 1 处相交,夹角为 α 。高精度 CCD 放置在可以前后移动的平移导轨上,通过调节 CCD 的左右偏转,可以使得 CCD 的接收面严格和抽运光的入射方向垂直,在 CCD 沿着导轨移动时,抽运光在 CCD 上的位置保持不变。CCD 的接受面的分辨率为 $4.4\ \mu\text{m}$,接收面横向最大平移距离为 7.1 mm ;平移导轨的精度

为 0.1 mm ,最大行程为 120.0 mm 。CCD 初始放置在位置 1 处,抽运光和信号光在 CCD 上的光斑图像重叠,CCD 上重叠点为 A_0 ,如图 5 所示。沿导轨移动 CCD,抽运光在 CCD 上的位置不变,保持在 A 点处,信号光和抽运光分离,从 CCD 上的 A 点偏移到 B 点。A 点和 B 点之间的距离 d 可以通过 CCD 的像素点来精确测量,如图 6 所示。位置 1 和位置 2 之间的距离 L 可以通过平移导轨的读数来读出。

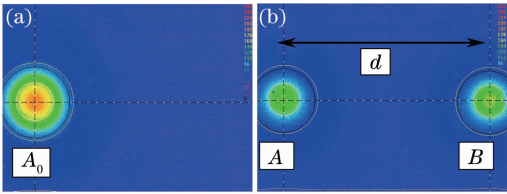


图 6 测量非共线角时 CCD 上的光斑图像
Fig. 6 Spot image on CCD when non-collinear angle is measured

CCD 上读出的光点变化距离可以组建一个直角三角形,如图 7 所示, A_0A 的长度为 L ,即为 CCD 水平移动距离, AB 的长度为 d ,为信号光和抽运光分离的距离。根据三角形计算公式可以得到 $\alpha = \arctan(d/L)$,即为抽运光和信号光的非共线夹角。

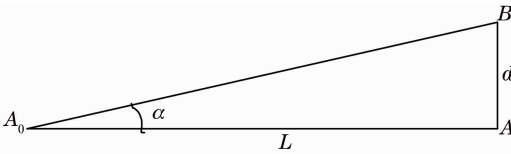


图 7 由测量数据计算非共线角示意图
Fig. 7 Diagram of the triangle using measured data to calculate the non-collinear angle

高精度 CCD 的分辨率为 $4.4 \mu\text{m}$; 平移台的平移精度为 0.1 mm ; 测量出的非共线角精度为 0.005° , 而实验要求精度为 0.01° , 该装置完全满足实验要求。

通过调节 M1 反射镜的转向,可以改变抽运光和信号光的夹角。在精密 CCD 测量方法的基础上,多次调节和测量可以将非共线角确定在 $2.80^\circ \sim 2.91^\circ$ 之间。精密 CCD 测量和 M1 反射镜的调节可以通过电动平移台配合电脑的测量反馈程序来完成。

4 实验测量不同非共线角下 YCOB 晶体的增益谱线变化

在 527 nm 抽运 800 nm 宽带 OPCPA 实验中,利用上述方法来调节两束光的非共线夹角。抽运光垂直晶体表面入射到晶体中,信号光以非共线角度入射到晶体中,非共线角的调节和测量利用上面所述的方法进行。在实验中研究了不同的非共线角对应理想相位匹配角下光谱增益情况,分别为 $\alpha = 2.95^\circ, \theta = 25.97^\circ$ 和 $\alpha = 2.85^\circ, \theta = 26.47^\circ$ 时的光谱增益情况。采用的晶体为 13 mm 厚的 YCOB 晶体,注入最大抽运光能量为 8 J ,注入信号光为 70 mJ ,注入信号光光谱全宽为 $750 \sim 840 \text{ nm}$ 。在实验中测

量了不同非共线角下以及不同转换效率下的 OPCPA 过程中放大的光谱形状。图 8 所示为非共线角等于 2.95° 时,转换效率为 14.37% 所对应的的光谱,其中,初始光谱为实线表示,放大后的光谱用十字线表示。注入的初始光谱半峰全宽为 $772 \sim 820 \text{ nm}$,光谱全宽为 $750 \sim 840 \text{ nm}$ 。光谱放大后半峰全宽为 $777 \sim 818 \text{ nm}$,共 41 nm 带宽。实验测量的光谱和理论计算光谱(图 4 中虚线所示)比较相近,放大光谱相对于注入光谱变窄,而且发生微小红移,短波长放大比较少,长波长放大比较多。

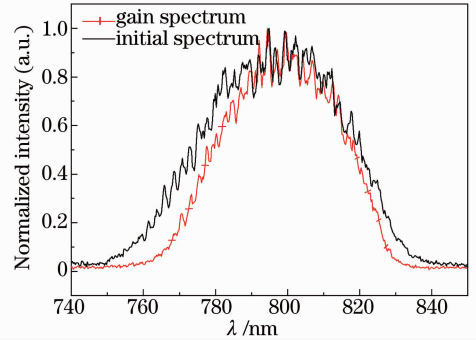


图 8 非共线角为 2.95° 、转换效率为 14.37% 时对应的的光谱
Fig. 8 Gain spectra of YCOB-OPCPA when conversion efficiency is 14.37% and non-collinear angle is 2.95°

图 9 所示为当非共线角为 2.85° ,相位匹配角调到理想角度时,YCOB 晶体的放大光谱,如图 9 中十字线所表示的增益光谱所示。从程序模拟中,可以得到这个理想的相位匹配角为 26.47° 。从图 9 中可以看到,当非共线角为 2.85° ,相位匹配角为 26.47° 时,YCOB 晶体放大光谱能够覆盖 $750 \sim 840 \text{ nm}$ 范围,将整个注入光谱都放大,在这种情况下,YCOB 晶体能够支持带宽大于 80 nm 的 OPCPA。根据程序计算,YCOB 能够支持的最大光谱增益要大于所

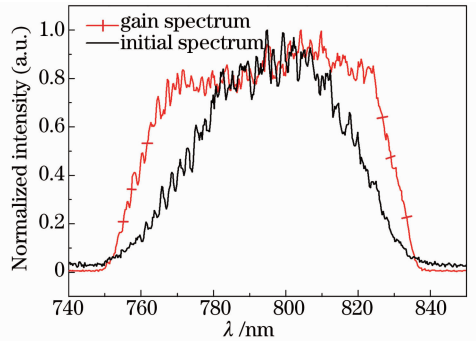


图 9 非共线角为 2.85° 时 YCOB-OPCPA 的初始注入光谱和放大光谱

Fig. 9 Initial injection spectrum and gain spectrum of YCOB-OPCPA when non-collinear angle is 2.85°

注入的光谱宽度,因此,如果注入更宽的初始光谱能够得到更宽的放大光谱。

5 结 论

从理论上分析非共线角和相位匹配角对 YCOB-OPCPA 增益光谱的影响,研究表明 YCOB-OPCPA 的增益光谱对非共线角和相位匹配角的变化均非常敏感,但当非共线角在 $2.80^{\circ} \sim 2.91^{\circ}$ 之间变化时,总能找到理想的相位匹配角,使之满足 80 nm 的宽带 OPCPA 放大。基于此结论,提出了基于高精度 CCD 的非共线角测量与调节方法,并在实验上利用该方法研究 YCOB-OPCPA 不同非共线角对应的不同光谱增益变化。在理论和实验上研究非共线角和相位匹配角对 YCOB-OPCPA 的影响,并提出基于精密 CCD 的非共线角测量方法,为高能 OPCPA 的单个调节提供参考。

参 考 文 献

- 1 Dubietis A, Jonušauskas G, Piskarskas A. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal[J]. *Opt Commun*, 1992, 88(4-6): 437-440.
- 2 Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt Commun*, 1985, 55(6): 447-449.
- 3 Sung J H, Lee S K, Yu T J, *et al.*. 0.1 Hz 1.0 PW Ti:sapphire laser[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(18): 3021-3023.
- 4 Chu Yuxi, Liang Xiaoyong, Yu Lianghong, *et al.*. Parasitic lasing suppression in large-aperture Ti:sapphire amplifiers by optimizing the seed-pump time delay[J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(5): 055302.
- 5 Liang X, Leng Y, Wang C, *et al.*. Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti:sapphire amplifier[J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15335-15341.
- 6 Chekhlov O V, Collier J L, Ross I N, *et al.*. 35 J broadband femtosecond optical parametric chirped pulse amplification system

- [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(24): 3665-3667.
- 7 Lozhkarev V V, Freidman G I, Ginzburg V N, *et al.*. Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals[J]. *Laser Phys Lett*, 2007, 4(6): 421-427.
- 8 Xu Lu, Yu Lianghong, Liang Xiaoyan, *et al.*. High-energy noncollinear optical parametric-chirped pulse amplification in LBO at 800 nm[J]. *Opt Lett*, 2013, 38(22): 4837-4840.
- 9 Ross I N, Matousek P, Towrie M, *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers[J]. *Opt Commun*, 1997, 144(1): 125-133.
- 10 Waxer L J, Bagnoud V, Begishev I A, *et al.*. High-conversion-efficiency optical parametric chirped-pulse amplification system using spatiotemporally shaped pump pulses[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(14): 1245-1247.
- 11 Wu Anhua, Jiang Linwen, Qian Guoxing, *et al.*. Bridgman growth of large-aperture yttrium calcium oxyborate crystal[J]. *Materials Research Bulletin*, 2012, 47(9): 2689-2691.
- 12 Yu Lianghong, Liang Xiaoyan, Li Jinfeng, *et al.*. Experimental demonstration of joule-level non-collinear optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(10): 1712-1714.
- 13 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): 0502013.
- 14 Aka G, Kahn-Harari A, Vivien D, *et al.*. A new non-linear and neodymium laser self-frequency doubling crystal with congruent melting: $\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3(\text{GdCOB})$ [J]. *European Journal of Solid State and Inorganic Chemistry*, 1996, 33(8): 727-736.
- 15 Huang Xiaojun, Zhang Shukui, Yuan Xiaodong, *et al.*. Theoretical study on pulse properties of optical parametric chirped pulse amplification[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(6): 757-760.
- 黄小军, 张树葵, 袁晓东, 等. 光参量啁啾脉冲放大过程中脉冲特性理论研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(6): 757-760.

栏目编辑:殷建芳