

# 光参量放大拼接晶体加工误差补偿系统设计

张军伟 闫 威 林东晖 吴文龙\* 王 逍 陈良明 傅学军

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 晶体拼接技术能够解决光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)过程中非线性晶体口径受限问题,从而有效地提高放大器的输出能力。晶体加工误差补偿是晶体拼接要解决的核心问题之一。对拼接晶体加工误差对光束质量的影响进行了分析,设计了拼接晶体加工误差补偿方案,设计并加工完成拼接晶体加工误差补偿能动反射镜。通过实验验证了拼接晶体加工误差补偿方案的可行性和稳定性,同时证明了该系统满足晶体拼接要求。

**关键词** 光学设计;光参量啁啾脉冲放大;拼接晶体;系统设计;加工误差补偿

中图分类号 TB133

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0116003

## Machining Error Compensation System Design of Optical Parametric Amplification Crystals Tiling

Zhang Junwei Yan Wei Lin Donghui Wu Wenlong Wang Xiao

Chen Liangming Fu Xuejun

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Tiling crystals technology can solve the problem of nonlinear crystal aperture limit in the process of optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA). The crystal machining error compensation is one of the most important problems need to be solved in crystals tiling. The beam quality influenced by tiling crystals machining error is analyzed and the machining error compensation method of tiling crystals is designed. According to the method, an active array mirror system is designed and machined, which is used to compensate the tiling crystal machining error. The feasibility and stability of tiling crystal machining error compensation system is tested, which indicates that the system can satisfy the crystal tiled requirement.

**Key words** optical design; optical parametric chirped pulse amplification; tiling crystals; system design; machining error compensation

**OCIS codes** 220.4830; 220.4840; 320.7080

## 1 引 言

获得超高峰值功率输出一直是激光技术追求的目标之一<sup>[1]</sup>。光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)<sup>[2-3]</sup>技术是获得超短超强高峰值功率激光脉冲的主要技术途径之一。OPCPA放大系统输出能力受限于光参量放大晶体的损伤阈值和口径。目前常用的晶体BBO, LBO, YCOB, KDP等损伤阈值有限<sup>[4]</sup>,为了不损伤晶体,必须通过扩大光束口径的方法来减小晶体单位面积内的能量密度,由于晶体生长技术限制,目前能够获取的晶体口径不能满足OPCPA系统要求,晶体拼接技术是扩大晶体口径、提高系统输出能力的重要途径。

晶体拼接需要控制晶体的角度误差和加工误差,角度误差主要影响激光束的能量转换效率<sup>[5-6]</sup>,而加工误差会影响激光光束质量。国外对倍频晶体的拼接研究有一些报道<sup>[7-9]</sup>,如Livemore实验室进行了针对倍频

收稿日期: 2014-08-03; 收到修改稿日期: 2014-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(61308040)

作者简介: 张军伟(1981—),男,博士,副研究员,主要从事光机电系统分析方面的研究。E-mail: zjw425@163.com

\* 通信联系人。E-mail: wwl803sc@163.com

应用的9块小口径KDP晶体的拼接实验,该拼接结构主要应用在纳秒激光系统中,对角度控制要求低,对厚度及楔角等加工误差也没有相应的补偿措施。

拼接晶体的角度误差可以针对晶体调整设计精密的调整机构,通过调整晶体匹配角,以实现较高的能量转换效率。晶体的厚度误差和楔角误差要求较高,仅靠加工很难保证,必须设计相应的误差补偿系统对加工误差进行补偿。本文主要针对加工误差的补偿系统进行研究。

## 2 加工误差对光束质量的影响

晶体拼接需要控制每块晶体的相位匹配角,以提高能量转换效率,另外需要控制晶体间的厚度误差和楔角误差,以保证光束质量。晶体厚度误差和楔角误差都是由于晶体加工导致的,图1所示为这两种误差的示意图。拼接晶体的厚度误差导致信号光通过晶体后产生相位差。表面楔角误差会导致激光脉冲产生波前畸变,影响信号光聚焦后的光束质量。

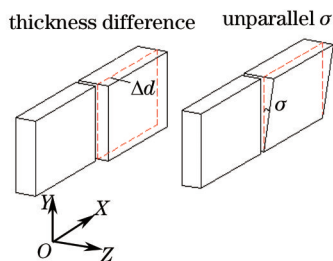


图1 加工误差示意图

Fig.1 Diagram of machining errors

假设相邻两块晶体厚度差为  $\Delta d$ ,晶体的折射率为  $n$ ,如图1所示。通过计算可知当光束通过拼接晶体后产生光程差  $\Delta$  为

$$\Delta = (n - 1)d. \quad (1)$$

光程差的产生会导致光束产生相位差,光程差引起的相位差为  $p = 2\pi\Delta/\lambda$ ,由于相位差的存在,光束聚焦后在远场焦斑会出现分裂现象。当相位差为  $0, 0.4\pi, \pi$ 时,远场焦斑的形态如图2所示。

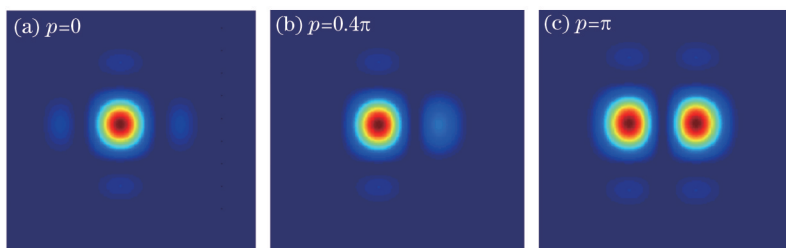


图2 晶体厚度误差对远场焦斑的影响

Fig.2 Effect of crystal thickness error to the far field focal spot

当晶体有楔角  $\sigma$  时,晶体的折射光束会偏折一个角度  $\omega$ 。

$$\omega = \arcsin(n \sin \sigma) - \sigma. \quad (2)$$

如果两块拼接晶体是理想状态不存在任何误差,两束子光束的远场焦斑将会呈现一个完整的焦斑。由于晶体表面楔角误差的存在将导致光束角度偏移,当光束发生偏移时,远场焦斑的变化情况如图3所示。

## 3 拼接晶体加工误差补偿系统设计

### 3.1 拼接晶体加工误差补偿方案

由上节分析可知,拼接晶体加工误差会影响光束质量,由于加工技术限制,晶体加工误差不可能消除,只能对加工误差进行补偿。针对  $2 \times 2$  晶体拼接,提出加工误差补偿方案如图4所示。

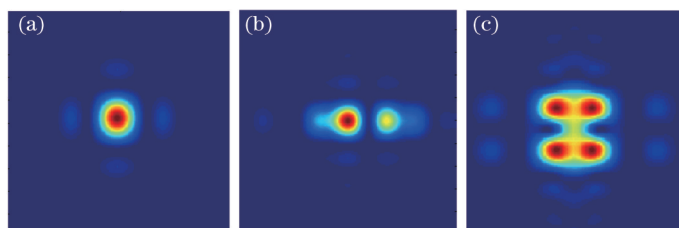


图3 表面不平行误差对远场焦斑的影响。(a) 无偏转; (b) 绕y轴旋转4 urad; (c) 绕x轴旋转4 urad  
Fig.3 Effect of crystal surface is unparallel to the far field focal spot. (a) No deflection; (b) rotate 4 urad around y axis;

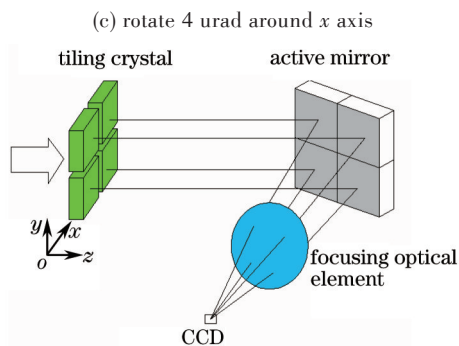


图4 加工误差补偿系统示意图

Fig.4 Schematic of machining error compensation system

光束通过拼接晶体后被分割成4路子光束,4路子光束分别通过能动反射镜反射后再通过聚焦元件聚焦,利用单色电荷耦合器件(CCD)相机来实时监测远场焦斑状态,精确调整能动反射镜对拼接晶体加工误差进行补偿。2×2阵列能动反射镜中每块反射镜必须能够实现绕x轴旋转、绕y轴旋转、沿z轴平动三种运动方式以满足误差补偿要求。

### 3.2 能动反射镜结构

能动反射镜是晶体拼接误差补偿系统的核心器件,针对2×2晶体拼接加工误差补偿,设计了2×2阵列能动反射镜,其结构如图5(a)所示。2×2阵列反射镜包含4块反射镜,每块反射镜可以实现绕x、y轴的旋转及沿z轴的平移三个自由度调整<sup>[10]</sup>。阵列能动反射镜采用模块化设计,每块反射镜的调整由三个压电驱动器实现,反射镜与压电驱动器之间通过柔性铰链进行连接,可以最大程度提高系统的稳定性。由于压电驱动器行程有限,反射镜初始的调整通过压电驱动器尾部的差动螺栓实现,通过宏微两级驱动器实现反射镜大行程和精密调整。由于压电驱动器不能承受剪切力,反射镜的支撑由反射镜底部的V形槽支撑[图5(b)]。阵列反射镜采用整体支撑结构以提高整体结构稳定性。

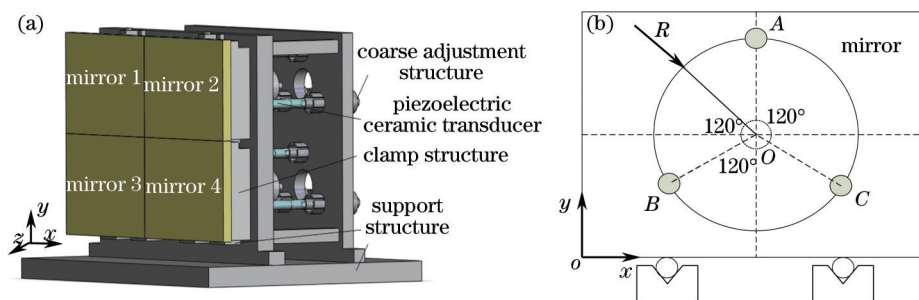


图5 2×2阵列能动反射镜结构示意图。(a) 整体结构; (b) 反射镜支撑

Fig.5 Schematic of 2×2 array adjusting mirrors. (a) Total structure; (b) mirror support structure

### 3.3 能动反射镜调整方案

4块阵列能动反射镜中的每一块能动反射镜背部用来驱动反射镜的三个压电驱动器呈△分布,驱动器分布情况如图6所示。

位移传感器a、b、c与驱动器A、B、C共同均匀分布在半径为R的圆上。位移传感器和电压驱动器配合使

用可以实现系统的闭环控制。当能动反射镜完成晶体拼接误差补偿以后,需要保持误差补偿系统长时间的稳定,确保光束不会发生漂移。此时位移传感器实时返回  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点的位移值。通过计算这三个点的位移值可以判断反射镜的空间姿态变化。

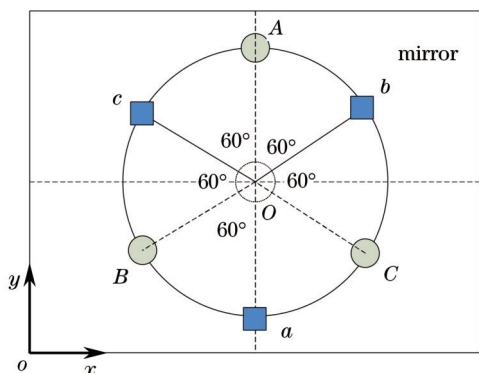


图6 电容位移传感器分布示意图

Fig.6 Distribution of capacitance displacement sensor

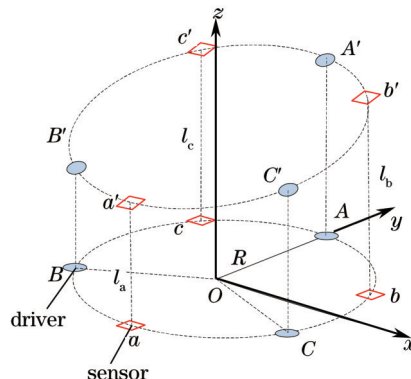


图7 反射镜位置变化示意图

Fig.7 Schematic of the adjusting mirror position changes

驱动器  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的位移分别为  $l_a$ 、 $l_b$ 、 $l_c$ ，反射镜沿  $z$  轴平移距离  $p$ ，绕  $x$  轴旋转的角度  $\theta_x$ ，绕  $y$  轴旋转的角度  $\theta_y$  的值可以通过(3)~(5)式得到。

沿  $z$  轴的平移计算公式为

$$p = \frac{l_a + l_b + l_c}{3}, \quad (3)$$

绕  $x$  轴旋转的角度  $\theta_x$  为

$$\theta_x = \frac{2l_a - (l_b + l_c)}{3R}, \quad (4)$$

绕  $y$  轴旋转的角度  $\theta_y$  为

$$\theta_y = \frac{l_b - l_c}{\sqrt{3}R}. \quad (5)$$

#### 4 拼接晶体加工误差补偿实验

为验证拼接晶体加工误差补偿方案的可行性,根据第3节所设计的误差补偿方案,搭建实验光路如图9所示。氦氖光源提供大口径的圆形光束。通过光阑对光束的口径进行调整,使得照在每块拼接晶体上的光束强度和面积尽量相同。光束通过拼接晶体后被分割为4路子光束。4路子光束经过能动反射镜后聚焦到CCD相机。通过CCD相机对光束远场焦斑进行实时监测。CCD相机前端为放大镜头,其作用是将CCD相机中的远场焦斑进行放大以便于观察。

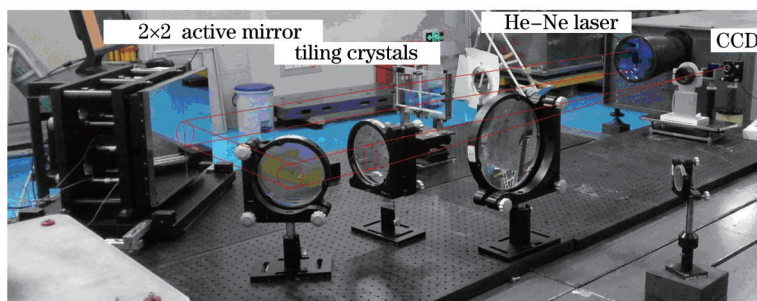


图8 实验光路图

Fig.8 Optical path of experiment

光束通过拼接晶体后再经过能动反射镜,通过透镜聚焦后在CCD相机中观察到的远场如图9(a)所示,此时可以看到4个分开的远场焦斑,这是由晶体拼接误差和能动反射镜本身误差所致。通过能动反射镜对拼

接误差进行补偿,补偿后远场焦斑呈现一个完整焦斑形态,如图9(b)所示,说明能动反射镜可以实现晶体拼接加工误差补偿。

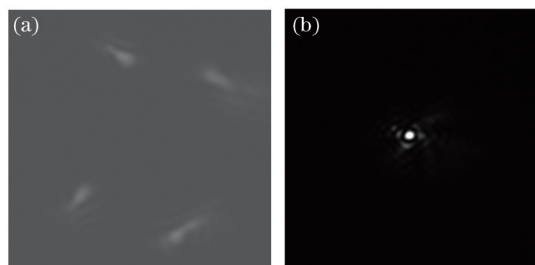


图9 误差补偿前后远场图。(a)调整前;(b)调整后

Fig.9 Far field images of before adjustment and after adjustment. (a) Before adjustment; (b) after adjustment

为了验证拼接晶体误差补偿系统的稳定性,用CCD相机采集远场焦斑数据,采集时间为30 min,采集周期为5 s,共采集到360幅图片。采集时间是根据目前系统的稳定运行时间要求确定的。30 min远场焦斑的形态变化情况如图10所示。图10(a)为开始时的远场焦斑状态,图10(b)为15 min后的远场焦斑状态,图10(c)为30 min后的远场焦斑状态。由图10可知,光束远场焦斑30 min内保持在较好状态,未发生分裂现象。

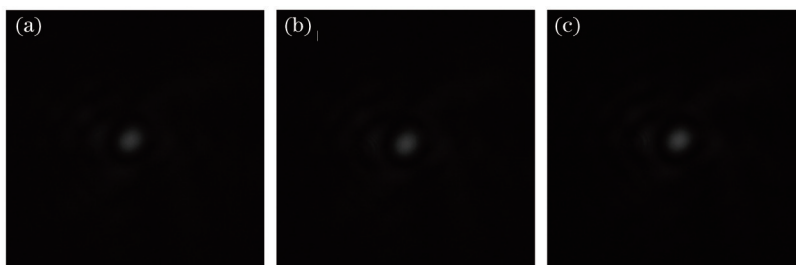


图10 远场焦斑监测情况。(a)开始时;(b)15分钟;(c)30分钟

Fig.10 Monitoring of far-field spot. (a) Beginning; (b) 15 min; (c) 30 min

远场焦斑的光强变化如图11所示。图11(a)为开始时的远场焦斑光强,图11(b)为15 min后的远场焦斑光强,图11(c)为30 min后远场焦斑光强。由图11可知,远场焦斑的光强主峰变化不明显。远场焦斑光强主峰和次峰的比值变化可以间接反映误差补偿系统的稳定性。从实验结果来看,系统具有较好的稳定性。

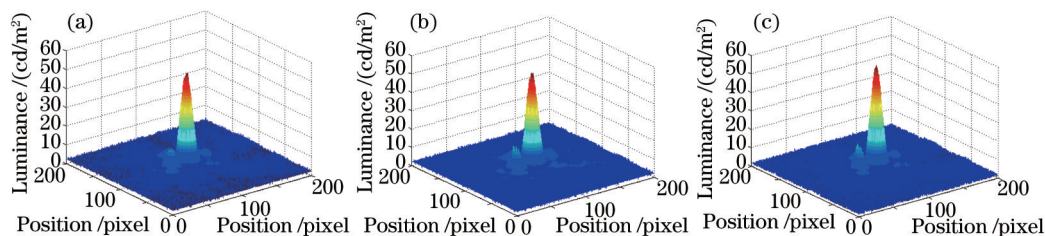


图11 远场焦斑光强变化情况。(a)开始时;(b)15分钟;(c)30分钟

Fig.11 Light of far-field focal. (a) Beginning; (b) 15 min; (c) 30 min

## 5 结 论

晶体拼接是OPCPA系统中获取大口径晶体的主要途径之一。晶体拼接需要控制晶体的角度误差和加工误差。对拼接晶体加工误差对光束质量的影响进行了分析,并设计了拼接晶体加工误差补偿方案及误差系统。拼接晶体加工误差补偿系统由能动反射镜和误差检测系统构成,其中能动反射镜是晶体拼接误差补偿的核心器件。采用压电驱动方式设计了阵列能动反射镜,基于阵列能动反射镜,对拼接晶体加工误差补偿方案进行了实验验证,实验结果验证了该拼接误差补偿方案的可行性,同时拼接晶体加工误差补偿系统具有较好的稳定性。目前系统能满足30 min的稳定性要求,但随着系统复杂性的提高,其稳定性是否仍能满足要求,需要进一步研究。

- 1 T Tajima, G Mourou. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics[J]. *Phy Rev Special Topics*, 2002, 5(3): 031303.
- 2 R A Baumgartner, L Byer. Optical parametric amplification[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1979, 15(6): 432-444.
- 3 I N Ross, P Matousek, M Towrie, *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplification[J]. *Opt Commun*, 1997, 144(1): 125-133.
- 4 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.
- 5 Zhang Xin, Wang Aikun, Xue Jianhua, *et al.*. Numerical calculation of conversion efficiency in type I frequency-doubling on LBO crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(12): 121602.  
张 鑫, 王爱坤, 薛建华, 等. LBO 晶体 I 类倍频相位匹配转换效率的数值计算[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(12): 121602.
- 6 Wang Nannan, Sun Meizhi, Xu Tingting, *et al.*. Analysis of optical parametric chirped pulse amplification spectrum and conversion efficiency resulting from time characteristic of signal pulse based on YCOB crystal[J]. *Chinese J Laser*, 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量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.
- 7 P J Wegner, M A Hennesian, D R Speck, *et al.*. Harmonic conversion of large-aperture 1.05- $\mu\text{m}$  laser beams for inertial-confinement fusion research[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(30): 6414-6426.
- 8 G J Linford, B C Johnson, J S Hildum, *et al.*. Large aperture harmonic conversion experiments at LLNL: Comments[J]. *Appl Opt*, 1983, 22(13): 1957-1958.
- 9 Z M Liao, I Jovanovic, C A Ebberts. Energy and average power scalable optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1277-1279.
- 10 Zhang Junwei, Chen Wei, Zhou Yi, *et al.*. Design and demonstration of high stability array tiled grating frame[J]. *Chinese J Laser*, 2012, 39(2): 0216001.  
张军伟, 陈 伟, 周 忆, 等. 高稳定性阵列光栅拼接架设计与验证[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0216001.

栏目编辑: 张浩佳