

光参量放大晶体拼接机构设计及拼接误差补偿

闫威^{1,2} 张军伟¹ 吴文龙¹ 王逍¹ 毋杰¹ 李志林¹ 粟敬钦¹ 林东晖¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)
² 重庆大学机械工程学院, 重庆 400030)

摘要 晶体拼接技术能够克服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。针对晶体拼接中相位匹配角的精确控制和晶体加工误差补偿问题,提出了“独立调整+误差补偿”的OPCPA晶体拼接技术方案,研制了 2×2 晶体拼接调整机构及 2×2 能动反射镜,每块子晶体可以进行3个自由度旋转以达到初始拼接角和相位匹配的目的,纳米精度的压电致动器驱动的 2×2 能动反射镜对晶体加工误差进行补偿。利用透射式元件对晶体拼接系统进行了可行性和稳定性验证,取得了较好的实验结果,证明该拼接调整方案是可行的。

关键词 光学器件; 光参量啁啾脉冲放大; 晶体拼接; 结构设计; 误差补偿; 稳定性

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0716001

Design of Optical Parametric Amplification Crystal Tiling Structure and Its Tiling Error Compensation

Yan Wei^{1,2} Zhang Junwei¹ Wu Wenlong¹ Wang Xiao¹ Mu Jie¹ Li Zhilin¹
Su Jingqin¹ Lin Donghui¹

(¹ *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*
² *College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China*)

Abstract Crystal tiling technology is a good way to solve the problem of nonlinear crystal aperture limit in the process of optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA), which can improve the output ability of the amplifier effectively. To solve the problem of precise control of the phase matching angle and the crystal machining error compensation in crystals tiling, a OPCPA crystal tiling method composing of the adjustment independent and the error compensation is proposed. A 2×2 array crystal tiling adjustment structure and a 2×2 active array mirrors are designed. Each sub-crystal can be rotated three degrees of freedom to achieve the purposes of initial adjustment tiling angle and phase matching. 2×2 active array mirrors which are driven by nanometer accuracy piezoelectric actuators are used to compensate the cutting error of the tiling crystals. An experiment is conducted to test the feasibility and stability of the crystal tiling system using transmission elements and get good results. The result indicates that the crystal tiling technology is practical.

Key words optical devices; optical parametric chirped pulse amplification; crystal tiling; structural design; error compensation; stability

OCIS codes 220.4830; 220.4880; 320.7080

1 引言

超高峰值功率输出一直是激光技术发展追求的

一个目标^[1]。光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)^[2-3]技术是获得超短超强高功率激光脉冲的主要技术途

收稿日期: 2013-12-05; 收到修改稿日期: 2014-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(61308040)

作者简介: 闫威(1989—),男,硕士研究生,主要从事机电一体化方面的研究。E-mail: 312714621@qq.com

导师简介: 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)

径之一,非线性晶体则是 OPCPA 技术的核心部分^[4]。通常在 OPCPA 过程中选用的晶体有偏硼酸钡(BBO)、三硼酸锂(LBO)、硼酸氧钙钇(YCOB)和磷酸二氢钾(KDP)等^[5],由于晶体的损伤阈值有限,而目前又无法获得足够大的晶体满足使用要求,这在一定程度上限制了 OPCPA 系统的输出能力^[6-7]。在 OPCPA 系统中想要获得更高峰值功率的超短脉冲激光,光学性能优越的大口径光参量放大晶体不可或缺,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。

文献[8]进行过针对倍频应用的 4 块小口径 KDP 晶体的拼接实验,该拼接结构的缺点是各晶轴的方向不能进行调整,针对厚度及楔角等加工误差也没有相应的补偿措施,最终的拼接误差取决于机械加工精度和装配精度。要想满足 OPCPA 过程的要求,必然会对加工精度和装配精度提出苛刻的要求,通常情况下不容易实现。

OPCPA 晶体拼接误差分为两类(调整误差和加工误差),针对两类误差提出了“独立调整+误差补偿”的拼接技术方案,研制了 2×2 拼接调整机构、补偿元件,并利用透射式元件(模拟晶体)进行了验证实验,证实了该方案的可行性。

2 晶体拼接误差组成

用于 OPCPA 的拼接晶体,拼接误差可分为两类,一类为调整误差,一类为加工误差。调整误差是指通过调整可以消除的误差,这里主要指晶体姿态(决定晶轴方向)与理想姿态(信号光与抽运光能实现精确位相匹配时的晶体姿态)的偏差,主要影响 OPCPA 过程中的能量转换效率,可分为绕 x 轴(水平方向)的旋转误差、绕 y 轴(竖直方向)的旋转误差和绕 z 轴(光路传输方向)的旋转误差,这类误差可通过精调晶体的姿态来消除;加工误差主要指晶体之间的厚度差和晶体前后表面的不平行度(楔角误差),主要影响光束最终的聚焦性能,此类误差在加工完成后往往难以改变,只能对其进行补偿。因此,针对 OPCPA 的拼接晶体,为了获得好的应用效果,本文采用的方案是“独立调整+误差补偿”。以一个 2×2 拼接方案为例,将支撑晶体的调整架设计为每一块晶体都可独立进行三维角度调整(用以消除调整误差),另外设计一个 2×2 补偿反射镜,光束透过晶体后由该反射镜反射,补偿镜可补偿晶体之间的厚度差,同时可校正由于楔角误差引起的光束偏折,使各子光束最终能聚焦于同一点形成完整的

焦斑。5 种晶体拼接误差分别表示为绕 x 轴旋转的角度调整误差 $d\theta_x$ 、绕 y 轴旋转的角度调整误差 $d\theta_y$ 、绕 z 轴旋转的角度调整误差 $d\theta_z$ 、厚度误差 Δd 和表面不平行(楔角)误差 α ,这 5 种误差示意图如图 1 所示。

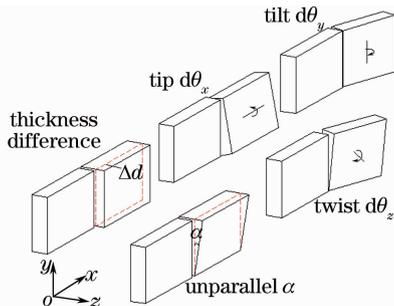


图 1 晶体拼接的 5 种误差

Fig. 1 Five kinds of error for crystal tiling

3 晶体拼接架设计

3.1 2×2 阵列晶体拼接调整架结构设计

基于第 2 节的分析,晶体拼接调整架的功能如下:1) 4 块晶体间距应尽量小,以减小能量损失;2) 每块晶体能够独立地进行三维旋转调整,以使主激光和信号光在每块晶体中均能满足精确的位相匹配关系。拼接示意图如图 2 所示。

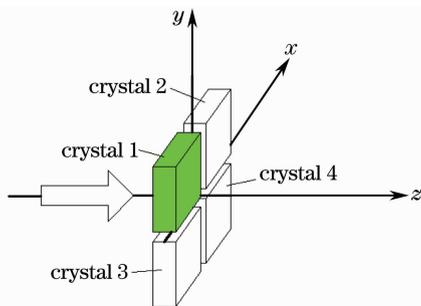


图 2 2×2 晶体拼接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 2×2 crystal tiling

在满足上述两个条件下,本文设计了一种 2×2 光参量晶体拼接结构,如图 3 所示。晶体拼接架主要由外边框、L 形内边框、拉伸弹簧、压缩弹簧和调整螺钉等组成。整体结构简单,晶体调整机构呈对称分布。外边框起整体支撑和固定作用,L 形内边框用于固定晶体,通过弹簧和调整螺钉实现晶体 3 个自由度的调整,L 形内边框和外边框通过预紧弹簧和调整螺钉固定。晶体阵列拼接架中的每块晶体尺寸为 $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 。

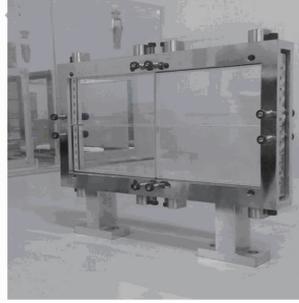
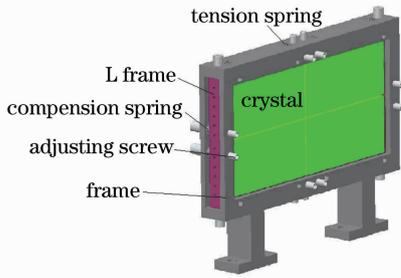


图 3 2×2 阵列晶体拼接架结构图

Fig. 3 2×2 array crystal tiling structure frame

3.2 拼接晶体的固定和调整原理

晶体的易碎特性决定其在固定时需要避免应力集中,常见的螺钉固定方式由于易导致应力集中,不易采用。胶接的固定方式不仅可以避免螺钉夹持所产生的应力集中,而且可以简化拼接架结构。晶体拼接固定如图 4 所示,在 L 形边框周围分布若干小孔用于填充粘接剂,使晶体和 L 形边框固定。

拼接架中总共包含 4 个 L 形内边框,其调整原理示意图如图 5 所示。L 形边框在拉伸弹簧的拉力和调整螺钉推力的相互作用下固定在外边框。同时调整上端两个螺钉可以实现上下两块晶体之间的缝隙调整,调整其中一个螺钉可以实现晶体绕 z 轴旋

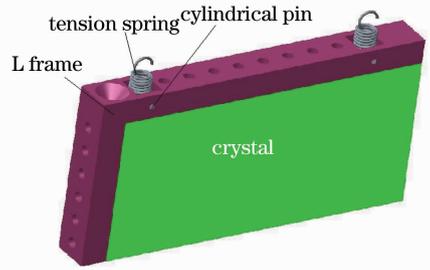


图 4 晶体拼接固定示意图

Fig. 4 Schematic of crystal tiling fixation

转角度调整。L 形边框背面的压缩弹簧和正面的调整螺钉将 L 形边框前后定位,通过调整螺钉可以实现绕 x 轴和 y 轴拼接角度误差调整。

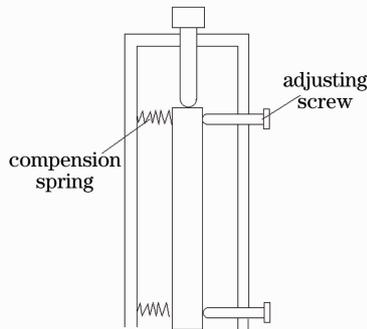
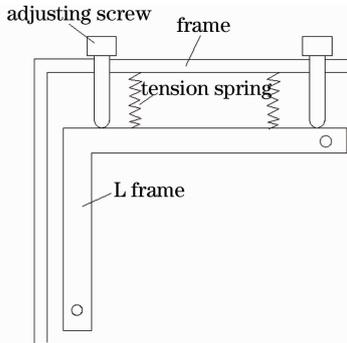


图 5 L 形内边框调整原理图

Fig. 5 Schematic of L-shaped frame adjustment

4 晶体拼接误差补偿方案设计

依据第 3 节的分析,楔角误差 α 和厚度误差 Δd 不能通过晶体调整架来消除,只能通过误差补偿方案来补偿这两种误差。晶体拼接误差补偿方案如图 6 所示,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,用 CCD 相机采集远场焦斑(实验中采用的是德国 Basler 公司生产的 avA1000-120 kml 型 CCD),调整能动反射镜进行误差补偿。实验中采用

的是文献[9]介绍过的 2×2 能动反射镜,反射镜单元尺寸为 210 mm×150 mm,其结构如图 7 所示。每块反射镜可以实现绕 x 轴旋转、绕 y 轴旋转和沿 z 轴平动三种调整方式。反射镜背部驱动机构由差动螺纹和压电陶瓷驱动器组合而成,分别用于实现拼接误差的粗调和精调。压电陶瓷驱动器是德国 PI 公司生产的 P-842.60 型压电驱动器,其精度在纳米量级,可以满足高精度的晶体拼接误差补偿。

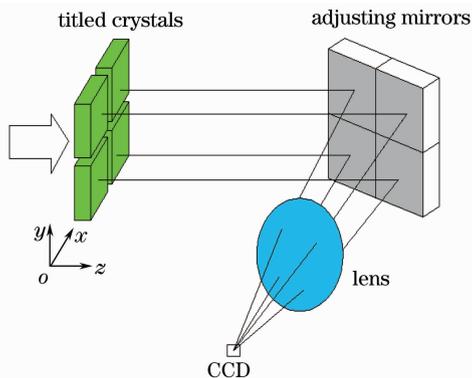


图 6 晶体拼接误差补偿系统示意图
Fig. 6 Schematic of error compensation system for crystal tiling

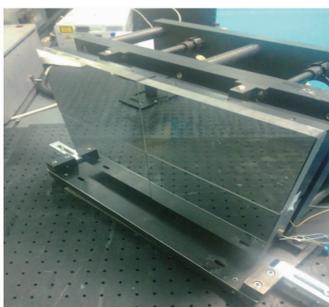


图 7 2×2 能动补偿反射镜结构
Fig. 7 Structure of 2×2 active compensation mirrors

5 实验验证

按照图 6 所示的方案搭建实验光路。为了验证拼接晶体的拼接误差对光束质量的影响和误差补偿系统的必要性,在没有误差补偿的情况下,观察光束在没有经过晶体和经过晶体的两种情况下远场焦斑的状态。通过透镜聚焦后 CCD 中观察到两种情况下的远场如图 8 所示,图 8(a)为没有经过拼接晶体时的远场,图 8(b)为经过拼接晶体后的远场焦斑。

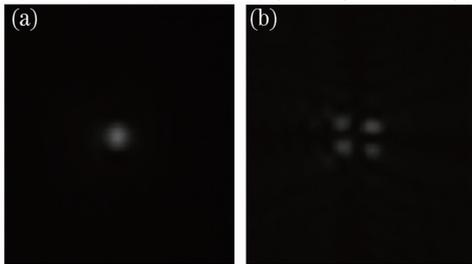


图 8 拼接晶体对远场焦斑的影响。(a) 穿过拼接晶体前;
(b) 穿过拼接晶体后
Fig. 8 Impact on the far-field focal spot of tiled crystals.
(a) Before acrossing tiled crystals; (b) after acrossing tiled crystals

通过远场焦斑图可以看到,拼接晶体使远场焦斑出现了分裂现象(楔角误差使光束偏折)。调整单块晶体的旋转自由度无法使远场焦斑合成,所以需要通过误差补偿来实现远场焦斑的合成。

为了验证误差补偿方案的可行性,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。

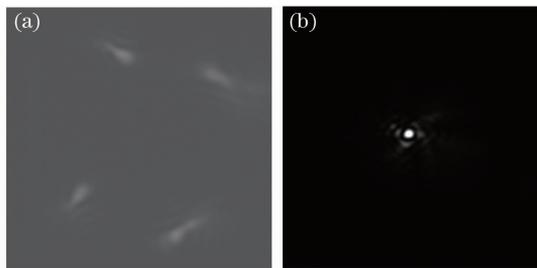


图 9 误差补偿前后远场图。(a) 调整前;(b) 调整后
Fig. 9 Far-field patterns before and after error compensation. (a) Before adjustment; (b) after adjustment

为了验证整个系统的稳定性和可靠性,在正常工作环境下,用 CCD 相机对远场焦斑进行了 1 h 的监测并对远场焦斑数据进行了采集。采集周期为 5 s,共采集了 720 幅图像。远场焦斑监测情况如图 10 所示。在 1 h 内,远场焦斑能保持在较好的状态。

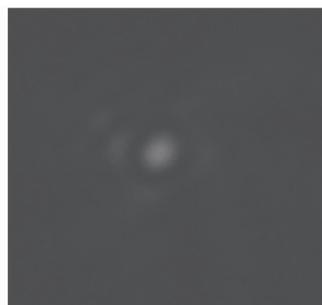


图 10 远场焦斑监测情况
Fig. 10 Monitoring of far-field focal spot

6 结 论

通过对晶体拼接误差的分析,设计了 2×2 阵列晶体拼接结构,每块子晶体可以进行 3 个自由度调整,满足了参量放大相位匹配角的调整要求,提出了高精度晶体拼接误差补偿方法。运用 2×2 高精度

能动反射镜对晶体拼接误差进行了补偿,实验验证了该拼接误差补偿方案的可行性,同时证明整个拼接系统具有较好的稳定性。在今后的研究工作中还需要进一步改进拼接结构,实现更大口径晶体的拼接,同时提高晶体拼接架的结构稳定性。

参 考 文 献

- 1 T Tajima, G Mourou. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics[J]. Phys Rev Special Topics, 2002, 5(3): 031301.
- 2 Baumgartner R A, Byer L. Optical parametric amplification[J]. IEEE J Quant Electron, 1979, 15(6): 432-444.
- 3 Ross I N, Matousek P, Towrie M, *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplification[J]. Opt Communi, 1997, 144(1): 125-133.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 M J Guardallben, J Keegan, L J Waxer, *et al.*. Design of a highly stable, high conversion efficiency, optical parametric chirped-pulse amplification system with good beam quality[J]. Opt Express, 2003, 11(20): 2511-2514.
- 7 Zhi M Liao, Igor Jovanovic, Chris A Ebberts. Energy and average power scalable optical parametric chirped-pulse amplification in yttrium calcium oxyborate[J]. Opt Lett, 2006, 31(9): 1277-1279.
- 8 G J Linford, B C Johnson, J S Hildum, *et al.*. Large aperture harmonic conversion experiments at LLNL: comments[J]. Appl Opt, 1982, 21(20): 1957-1958.
- 9 Zhang Junwei, Chen Wei, Zhou Yi, *et al.*. Design and demonstration of high stability array tiled grating frame[J]. Chinese J Lasers, 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:史 敏