

两端支撑夹持结构参数对三倍频转换效率的影响

张 洋^{1,2} 熊 召² 徐 旭² 叶 朗² 袁晓东² 周 海² 张 彬¹

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610041
² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 在高功率固体激光器的终端光学组件中,为了提升三倍频转换效率,对大口径薄型 KDP 晶体采取两侧支撑的夹持方法,并利用有限元分析软件建立了夹持系统的仿真模型。在此基础上,计算分析了晶体以不同倾斜角度放置时,支撑条数目和长度等夹持系统结构参数对晶体附加面形、相位匹配角及三倍频转换效率的影响。研究结果表明:晶体两侧支撑条总数为 4 时,大口径薄型 KDP 晶体附加面形的峰值谷值和均方根值、晶轴变化的平均值和三倍频转换效率随支撑条长度的变化不大,且可获得理想的三倍频转换效率。解决了反复调试 KDP 晶体面形质量的问题而缩短了工程装校时间。

关键词 非线性光学; 夹持结构; 三倍频转换效率; KDP 晶体; 支撑条

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0602008

Influence of Structure Parameters for Two Sides Support on Third Harmonic Conversion Efficiency

Zhang Yang^{1,2} Xiong Zhao² Xu Xu² Ye Lang² Yuan Xiaodong²
Zhou Hai² Zhang Bin¹

(¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610041, China)
(² Research Center of Laser Fusion, China Academy Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In final optics assembly of high-power solid-state laser, in order to improve the third harmonic generation (THG) efficiency, the method of both sides support for ultra-thin KDP crystals with large-aperture is adopted, and simulation model, is built using finite element analysis software. On this basis, the influence of parameters of clamping system including the number and length of support bars on the additional surface shape of KDP crystals, phase matching angle and THG efficiency are calculated and analyzed for the case of KDP crystals placed at different tilt angles. The results show that, when the number of support bars is four, the peak valley (PV) and root-mean-square (RMS) values of additional surface profile of ultra-thin KDP crystals with large-aperture, the mean value of crystal axis and THG efficiency almost keep unchanged with the length of support bars and an ideal THG efficiency is achieved. Consequently, the problems of repeating test on the quality of KDP crystals' surface profile can be solved, and the time for engineering assembly and calibration can be reduced.

Key words nonlinear optics; clamping structure; third harmonic conversion efficiency; KDP crystals; support bars

OCIS codes 190.2620; 140.3580; 160.4330

1 引 言

高功率固体激光器终端光学组件(FOA)中的频率转换效率问题一直受到人们关心和重视^[1-3]。

特别是大口径薄型 KDP 晶体在非垂直状态放置时,其面形会在重力和夹持力的作用下发生改变,进而因晶轴弯曲而导致三倍频转换效率降低^[4-8]。为

收稿日期: 2013-11-04; 收到修改稿日期: 2014-01-07

基金项目: 四川省教育厅创新团队计划(13Td0048)、精密洁净装校工艺研究与方案验证项目(GFZX0205010208.1)

作者简介: 张 洋(1988—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光频率转换及大口径光学元件精密装校工程等方面的研究。E-mail: zhangyangff88@163.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,博士,教授,主要从事激光物理与技术等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

了最大限度地提升三倍频激光的转换效率,需要通过改善晶体附加面形质量来改变作用在晶体上的力的分布,即改变晶体框的夹持结构。

目前,针对大口径薄型 KDP 晶体的夹持方案主要有:美国国家点火装置(NIF)的四周夹持方案^[9-10]、我国某大型高功率激光器的三点夹持方案^[11]、法国兆焦耳激光器(LMJ)的两侧粘胶方案^[12]。四周夹持方案和三点夹持方案中,压片对晶体施加的正压力分布及其大小对晶体频率转换效率的影响较大,而两侧粘胶方案中不需要压片对晶体施加正压力,但长方形硅胶条的使用会带来对光学元件污染的巨大隐患。为此,将采用长方形硅胶条的两侧粘胶方案改进为采用支撑条的两侧支撑方案。本文针对大口径薄型 KDP 晶体两侧支撑方案,利用有限元法建立了晶体及夹具的仿真模型,计算分析了支撑条长度及数目等结构参数对大口径薄型 KDP 晶体附加面形的影响,进而计算得到了相应的相位匹配角及三倍频转换效率。

2 物理模型及计算方法

高功率固体激光器的频率转换系统通常由大口径的 I / II 类 KDP 晶体构成,如图 1 所示。其中, k 表示基频光波矢, E_{ω} 、 $E_{2\omega}$ 和 $E_{3\omega}$ 分别表示基频波、二次谐波(SHG)和三次谐波(THG)的光场。支撑条均沿 e 轴方向对二倍频和三倍频晶体进行支撑,摆放在晶体下方边缘,如图 2 所示。取晶体下表面中心为原点(O),以平行于晶体边长且沿支撑条摆放位置的直线为 x 轴。

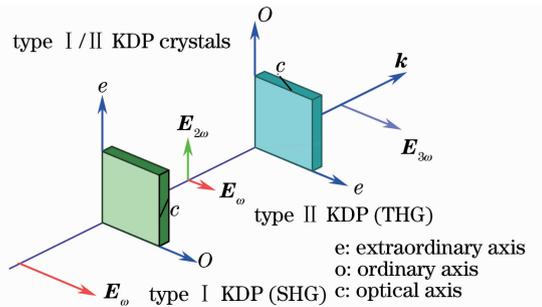


图 1 三次谐波系统

Fig. 1 Configuration of the third harmonic generation

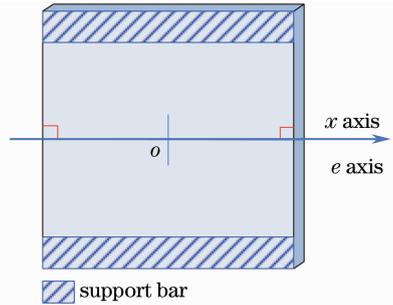


图 2 支撑条摆放位置及对应 x 坐标的示意图

Fig. 2 Position of support bar and x axis

经理想加工后的大口径薄型 KDP 晶体的横截面为正方形,因此在两侧支撑方案中,其支撑条分布采取完全对称的方式。图 3 给出了利用有限元分析软件建立的 KDP 晶体在两侧支撑夹具中的简化模型,其中, n 表示每侧支撑条数目。晶体侧面有 24 个顶端由特殊材料制成的小圆柱镶嵌的不锈钢螺钉,由于只有小圆柱、支撑条及压片与晶体直接接触,且小圆柱及压片对晶体的作用力几乎为零,故简化了夹具夹持晶体的仿真模型。该模型主要由三部

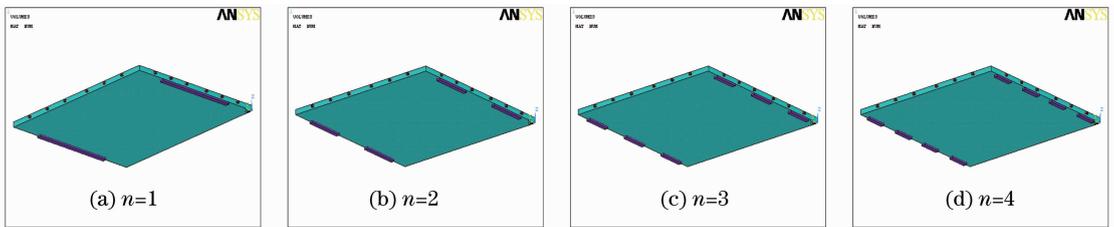


图 3 支撑条为不同数目时的夹持系统仿真模型

Fig. 3 Simulation models of clamping system with different number of support bars

表 1 支撑条参数

Table 1 Parameters of support bar

n	1	2	3	4
l_1/mm	$(0, L]$	$(0, L/2]$	$(0, L/3]$	$(0, L/4]$
x/mm	$-l_1/2 \sim l_1/2$	$-(L/2+l_1)/2 \sim -(L/2-l_1)/2$ $(L/2-l_1)/2 \sim (L/2+l_1)/2$	$-(2L+2a+3l_1)/6 \sim -(2L+2a-3l_1)/6$ $-l_1/2 \sim l_1/2$ $(2L+2a-3l_1)/6 \sim (2L+2a+3l_1)/6$	$-(3L+2a+4l_1)/8 \sim -(3L+2a-4l_1)/6$ $-(L-2a+4l_1)/8 \sim -(L-2a-4l_1)/8$ $(L-2a-4l_1)/8 \sim (L-2a+4l_1)/8$ $(3L+2a-4l_1)/6 \sim (3L+2a+4l_1)/8$

分组成:小圆柱、支撑条及晶体。在建模过程中,支撑条上表面相对晶体的具体摆放位置如表 1 所示,其中, l_1 为每块支撑条的长度,晶体的长和宽均为 $L=430$ mm。

夹具框架采用的不锈钢材料参数:泊松比为 0.3,弹性模量为 206 GPa,密度为 7930 kg/m^3 ;小圆柱的材料参数:泊松比为 0.4,杨氏模量为 1 MPa,密度为 2200 kg/m^3 ;各向异性的 KDP 晶体材料参数:密度为 2340 kg/m^3 ,刚度矩阵 \mathbf{D} (单位为 GPa)为^[13]

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 71.2 & -5.0 & 14.1 & & & \\ -5.0 & 71.2 & 14.1 & & & \\ 14.1 & 14.1 & 56.8 & & & \\ & & & 12.6 & & \\ & & & & 12.6 & \\ & & & & & 6.22 \end{bmatrix}.$$

二倍频晶体的方位角及匹配角分别为 45° 、 41.19° ,厚度为 12.0 mm;三倍频晶体的方位角及匹配角分别为 0° 、 59.07° ,厚度为 9.0 mm。

建模及计算过程如下:建立几何模型;设置各模块材料属性;划分网格:KDP 晶体为 $86 \times 86 \times 3$ 个单元^[14];建立接触对;设置边界条件;计算求解。其中,KDP 晶体是通过使用方位角及匹配角来建立材料坐标系,设置非线性参数,然后还原坐标系,使建立的 KDP 晶体仿真模型与实际属性完全对应,并且,在对支撑条和晶体划分网格时,使接触面上的晶体和支撑条单元表面完全重合。针对建立的计算模型,利用文献[14]给出的法国 LMJ 相应参数及结果进行了校核:二倍频晶体面形峰谷(PV)值的相对误差为 1.27%,三倍频晶体面形 PV 值的相对误差为

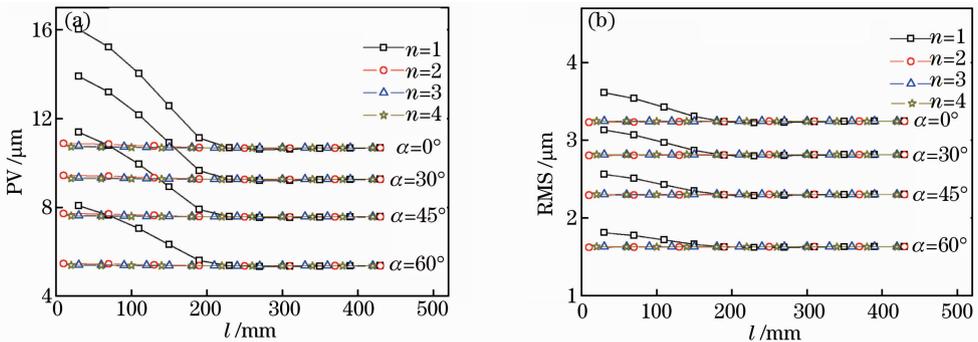


图 4 KDP 晶体附加面形变化(a)PV 面形变化;(b)RMS 面形变化

Fig. 4 Variation value of additional surface of KDP crystal (a) PV variation; (b) RMS variation

当 $n=1$ 且 $l \geq 270$ mm 或 $n=2, 3, 4$ 时,随着 l 的增大,晶体附加面形参量随 α 的变化如表 2 所示。其中, m_i 表示参量值, $i=1, 2, 3, 4$ 。

1.12%,从而验证了本文建模方法的正确性及理论建模的可靠性。取 l_1 以 $a=5$ mm 为单位长度进行改变,支撑条的宽度及厚度分别为 10 mm 和 5 mm。

采用有限元法计算晶体以不同倾角放置,支撑条 n 、 l_1 为不同值时,经夹持后的晶体附加面形分布;进而计算得到晶体附加面形 PV 值、均方根(RMS)值,及沿晶体 e 轴方向失谐角分布的平均值($\Delta\theta$);最后,利用分步傅里叶算法和龙格-库塔法求解,并考虑光束的衍射和走离、三阶非线性效应、光在晶体表面的反射和体内的吸收及损耗等效应的耦合波方程组,得到了 KDP 晶体三倍频转换效率。

3 支撑条参数对 KDP 晶体附加面形的影响

初始面形为理想平面的二倍频晶体(I类 KDP 晶体)经夹具夹持后,附加面形的 PV 值及 RMS 值随每侧支撑条总长度 l 的变化曲线如图 4 所示。其中, α 为晶体表面与水平面的夹角。由图 4 可知:对于给定的每侧支撑条数目 n ,晶体附加面形参量(PV 值和 RMS 值)随着晶体表面与水平面的夹角 α 的增大而减小,这是因为导致晶体附加面形发生改变的力主要沿其法线方向,随着 α 的增大,晶体重力在其表面法线方向上的分量是不断减小的。当 α 相同时,随着 l 的增大, $n=1$ 对应的晶体附加面形参量先减小而后基本保持不变,而 $n=2, 3, 4$ 对应的相应参量则基本保持不变。因此,当晶体以某一倾斜角度放置且 $n \geq 2$ 时,晶体下表面至少会受到 4 个支撑条的支撑作用,此时,每侧支撑条数目及长度对 KDP 晶体的附加面形的影响不大。

从表 2 可以看出,晶体附加面形参量与 α 的关系可近似表示为: $m_i(\alpha)/m_i(0^\circ) \approx \cos \alpha$ 。由此可见,在两侧支撑方式下,可以根据晶体在某一倾斜角度放置

时的附加面形参量,在实验误差允许的范围內推测晶体以任意其他角度放置时的附加面形参量。

表 2 晶体附加面形随倾斜角 α 的变化关系

Table 2 Variation of KDP crystals' additional surface with α

α	PV				RMS			
	SHG		THG		SHG		THG	
	$m_1/\mu\text{m}$	$m_1(\alpha)/m_1(0^\circ)$	$m_2/\mu\text{m}$	$m_2(\alpha)/m_2(0^\circ)$	$m_3/\mu\text{m}$	$m_3(\alpha)/m_3(0^\circ)$	$m_4/\mu\text{m}$	$m_4(\alpha)/m_4(0^\circ)$
0°	10.68	1.00	18.68	1.00	3.24	1.00	5.68	1.00
30°	9.26	0.87	16.18	0.87	2.81	0.87	4.92	0.87
45°	7.57	0.71	13.24	0.71	2.30	0.71	4.03	0.71
60°	5.37	0.50	9.37	0.50	1.63	0.50	2.85	0.50

4 KDP 晶体三倍频转换效率随支撑条长度的变化

面形的畸变必然引起晶体局部晶轴的变化,进而导致高功率激光入射晶体后的相位匹配角发生改变。图 5 给出了晶体晶轴沿 e 轴方向的相位匹配角的平均变化量 $\Delta\theta_{\text{ave}}$ 与 n, α 和 l 的变化曲线。从图 5 可以看到, I / II 类 KDP 晶体的 $\Delta\theta$ 与各变量的变化趋势相同,因而只需讨论 I 类 KDP 晶体即可。当 n 及 l 一定时, $\Delta\theta$ 随着 α 的增大而减小,这是由于随着 α 的增加,晶体表面面形参量值不断减小的结

果。从图 5 还可以看出,当 α 一定时, $n=1$ 对应的 $\Delta\theta$ 随 l 的增加先减小后缓慢增大,且在 $l=270$ mm 达到最小。然而,随着 l 的增加, $n=2$ 对应的 $\Delta\theta$ 小幅度增大, $n=3,4$ 对应的 $\Delta\theta$ 则基本不变。据此,可以推测 $n>3$ 对应的 $\Delta\theta$ 分布与 $n=3$ 对应的 $\Delta\theta$ 分布基本相同,而 $n=2$ 对应的 $\Delta\theta$ 比 $n\geq 3$ 对应的 $\Delta\theta$ 小,因此,最佳的夹持方案则只能从 $n=1$ 或 $n=2$ 中选择。然而,由于 l 对 $n=2$ 时 $\Delta\theta$ 的影响非常小,但对 $n=1$ 时 $\Delta\theta$ 的影响十分明显,且 $\Delta\theta(n=1)\leq\Delta\theta(n=2)$ 时,要求 $l\geq 230$ mm。

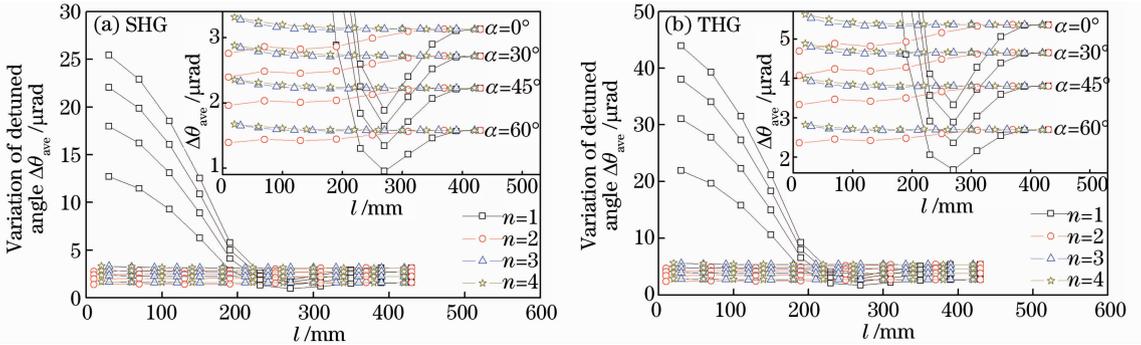


图 5 KDP 晶体沿 e 轴方向的相位匹配角(外角)变化量

Fig. 5 Variation of detuned angle (external) of KDP crystal along e axis

晶体相位匹配角的改变,将直接影响高功率激光的三倍频转换效率。三倍频计算模型以三维耦合波方程组为基础,综合考虑衍射和走离、三阶非线性效应及晶体的吸收等^[6,15]。当基频光以不同功率密度($I=2,3,4,5$ GW/cm²)入射到夹持后的 I / II 类 KDP 晶体时,三倍频转换效率达到最高时的效率值 η 与 n, α 和 l 的变化关系如图 6 所示。从图 6 可以看到,当 I, n 和 l 一定时, η 随 α 的增大而减小,这是由于随着 α 的增大,晶体对应的相位匹配角逐渐减小;当 α, n 和 l 一定时, η 随 l 的增大而增大。由此可见,为了获得较高的三倍频转换效率,应增大晶体表面与水平面的夹角,并适当提高入射基频光的功率密度。当 I 和 α 一定时, $n=3,4$ 对应的 η 随 l 的增大基

本不变, $n=2$ 对应的 η 随 l 的增大先略微上升后小幅度缓慢下降, $n=1$ 对应的 η 随 l 的增大先快速增加后缓慢下降,且在 $l=270$ mm 达到最大。

此外,从图 6 还可以看出,当 I 和 α 一定时, $n=1$ 且 $l=270$ mm(方案一)对应的三倍频转换效率 η_1 最大, $n=2$ 且 l 为任意长度(方案二)对应的最大三倍频转换效率值 η_2 比 $n>2$ 对应的最大三倍频转换效率 η_3 值大。因此,为了获得最高的三倍频转换效率,应选择支撑方案一。然而,对于入射基频光的功率密度 $I<3$ GW/cm² 时,有 $(\eta_1 - \eta_2)<0.03\%$,并且夹具中支撑条的长度越长,精密加工量也就越大。由此可见,在实际工作中,综合考虑应以方案二为最佳,即两侧支撑方式的每侧支撑条为两根,其长度可

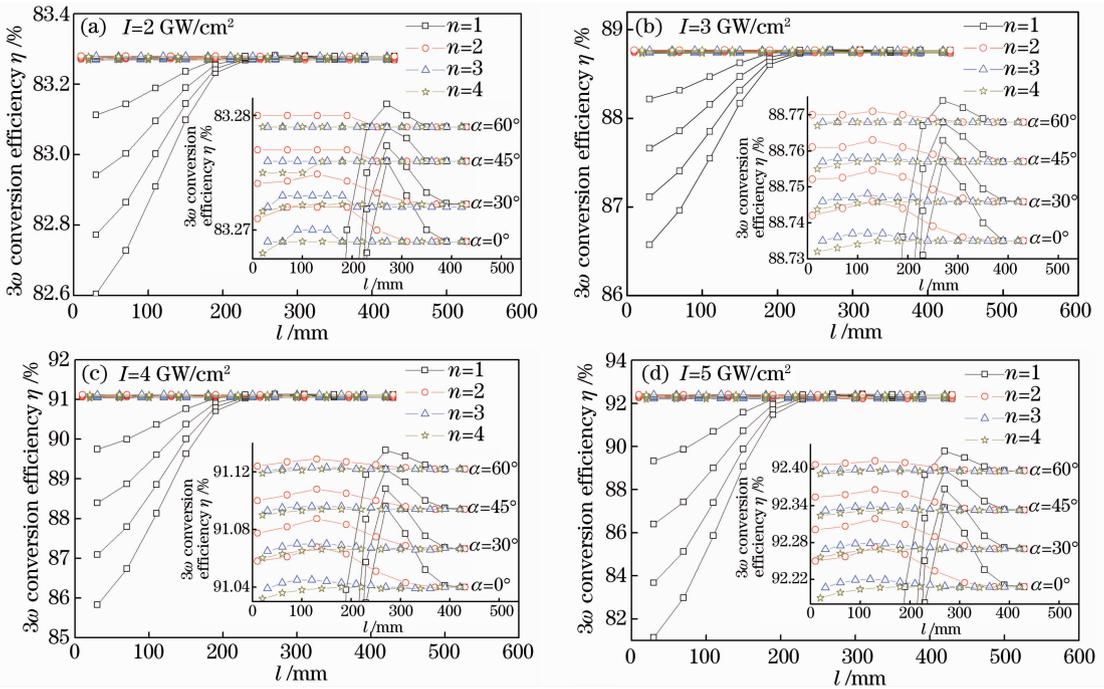


图 6 KDP 晶体三倍频转换效率

Fig. 6 3ω conversion efficiency of KDP crystals

根据精密加工的需要任意选择。

5 结 论

通过对高功率固体激光装置中三倍频转换过程的分析,针对大口径薄型 KDP 晶体采取了两侧支撑的夹持方式,因而作用在晶体上的作用力主要由重力和支撑条的支撑力组成,不再需要对压条施力而节省了大量工程时间及费用,也突显出支撑条的长度 l 及数目 n 对晶体附加面形分布的重要作用。

通过分析 n 及 l 对晶体三倍频转换效率的影响发现,对于以不同倾斜角度放置的晶体来说, n 及 l 对晶体附加面形的 PV 值和 RMS 值的影响趋势与对晶体晶轴平均变化量的变化趋势一致,而与对三倍频转换效率值的变化趋势相反。综合考虑支撑条的长度 l 及数目 n 对三倍频激光转换效率的影响,以及对应的支撑条材料费用,选取夹持框架中的支撑条 $n=2$ 且 l 适当长度为最佳方案,可为明显缩短精密装校时间、提升高功率激光三倍频转换效率提供理论参考。

参 考 文 献

- Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo, *et al.*. Physical performance optimization for high power Nd:Glass solid state laser amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(s1): 81–85.
於海武, 郑万国, 贺少勃, 等. 高功率钕玻璃固体激光放大器物理性能优化设计[J]. 中国激光, 2002, 29(s1): 81–85.
- Du Xiangwan. Factors influencing key characteristic quality of

- high energy laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(5): 945–947.

- 杜祥琬. 影响高能激光系统核心特征量的要素[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(5): 945–947.

- Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502003.

- 代守军, 何兵, 周军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502003.

- Li Ping, Liang Yue, Xu Bing, *et al.*. Study on gain stability of main amplifier in high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102007.

- 李平, 梁越, 徐冰, 等. 高功率激光装置主放大器的增益稳定性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102007.

- Li Keyu, Jia Huaiting, Wang Chengcheng, *et al.*. Output-ability analysis of high-intensity third harmonic generation system for ICF driver[J]. Chinese J Lasers, 2006, 23(7): 903–909.

- 李格宇, 贾怀庭, 王成程, 等. 惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统输出能力分析[J]. 中国激光, 2006, 23(7): 903–909.

- Jia Kai, Xiong Zhao, Yang Chuang, *et al.*. A mounting configuration for efficient third harmonic conversion of KDP crystals with large aperture[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702004.

- 贾凯, 熊召, 杨闯, 等. 大口径 KDP 晶体实现高效三倍频转换的新型支撑结构[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702004.

- Zhang Junyong, Sun Meizhi, Zhang Yanli, *et al.*. Inverse problem of frequency conversion at SG-II final optical assemble [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0916003.

- 张军勇, 孙美智, 张艳丽, 等. 神光 II 终端光学组件的频率变换逆问题研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0916003.

- Ji Lailin, Liu Chong, Tang Shunxing, *et al.*. Phase perturbation of large aperture KDP crystal manufacturing and effects on third harmonics generation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502012.

- 季来林, 刘崇, 唐顺兴, 等. 大口径 KDP 晶体加工相位扰动与三次谐波转换[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502012.

- P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics

- system; frequency conversion and beam conditioning[C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- 10 J M Auerbach, C E Barker, S A Cotutire, *et al.*. Modeling of frequency doubling and tripling with converter refractive index spatial non-uniformities due to gravitational sag[C]. SPIE, 1999, 3492: 472-479.
- 11 Yu Wengfeng, Sun Feng, Cheng Zuhai, *et al.*. Effects on the mirror's thermo-deformation and deflection of different supporting way[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(1): 29-32.
余文峰, 孙 峰, 程祖海, 等. 夹持方式对镜面热变形及偏转的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(1): 29-32.
- 12 J M Auerbach, C E Barker, S C Burkhart, *et al.*. Frequency converter development for the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1999, 3492: 392-405.
- 13 Cui Kaihong, Zhang Bin, Jia Kai, *et al.*. Effect of clamps on surface profiles of harmonic generation KDP crystals[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1538-1542.
崔凯洪, 张 彬, 贾 凯, 等. 夹持方式对频率转换 KDP 晶体面形的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1538-1542.
- 14 O Lubin, C Gouedard. Modeling of the effects of KDP crystal gravity sag on third-harmonic generation[C]. SPIE, 1999, 3492: 802-808.
- 15 Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu, *et al.*. Influence of KDP crystals. refractive-index non-uniformities on 3ω conversion efficiency[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 746-749.
王 芳, 粟敬钦, 李恪宇, 等. KDP 晶体折射率不均匀性对三倍频转换效率的影响[J]. 强激光与离子束, 2007, 19(5): 746-749.

栏目编辑: 宋梅梅