

# KDP 晶体中高频相位调制对神光Ⅱ升级装置的影响

刘 栋<sup>1</sup> 季来林<sup>1</sup> 王 利<sup>2</sup> 朱海东<sup>2</sup> 郭爱林<sup>2</sup> 马伟新<sup>1</sup> 朱 俭<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800  
<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘要** 在高功率激光装置中,大口径电光开关晶体 KDP 在表面抛光过程中会引入大量的中高频调制,这种中高频段调制会对高功率激光驱动器性能产生影响。基于快速傅里叶变换理论和元件波前数据,对神光Ⅱ升级装置进行了计算模拟,研究中高频调制对光束近场均匀性和远场聚焦能力的影响,并且讨论了在光束传输放大过程中该频段调制对装置的可能危害。

**关键词** 激光光学;高功率激光;KDP 晶体;周期性调制

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1002012

## Effects of Phase Perturbation of KDP Crystal in Middle and High Spatial Frequency on SG II Updated Laser Facility

Liu Dong<sup>1</sup> Ji Lailin<sup>1</sup> Wang Li<sup>2</sup> Zhu Haidong<sup>2</sup> Guo Ailin<sup>2</sup>  
Ma Weixin<sup>1</sup> Zhu Jian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The perturbation of middle and high spatial frequency caused by the polish process of the large aperture KDP crystal in high-power laser system has a certain impact on the performance of the facility. To study the effects of this kind of phase perturbation on the near-field uniformities and far-field focusing abilities, a calculation model which is based on fast Fourier transform (FFT) theory and optics wavefront data of SG-II is established. The potential dangerousness which derives from the laser propagation to the facility is discussed.

**Key words** laser optics; high-power laser; KDP crystal; period perturbation

**OCIS codes** 050.5080; 260.1960; 350.5500

## 1 引言

在惯性约束聚变(ICF)高功率固体激光驱动器中,光束从预放注入到最终输出要历经上百个光学表面,不同光学元件由于其加工方式和不可避免的加工误差将会引入各个频段的波前信息,而不同频段对装置性能的影响是有差别的,美国国家点火装置(NIF)通过研究将整个空间频率划分为 4 个区域<sup>[1]</sup>,并对不同空间频段的波前相位进行了约束和

限定,以达到最终性能的要求,其中低频段面形区(空间周期 $L > 33$  mm)将影响焦斑主瓣的能量分布;中频段纹波-1区( $2.5$  mm $<L < 33$  mm)和纹波-2区( $0.12$  mm $<L < 2.5$  mm)在放大传输过程中将形成较大的调制,影响焦斑旁瓣的能量分布,并且有可能导致光学元件的损伤;高频段粗糙度区( $L < 0.12$  mm)对应着大角度散射,成为系统的杂散光,造成了能量损失。在波前控制中,变形镜<sup>[2]</sup>和

收稿日期: 2013-04-25; 收到修改稿日期: 2013-06-06

作者简介: 刘 栋(1987—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光驱动器波前控制方面的研究。

E-mail: L\_dong1987@tom.com

导师简介: 朱 俭(1961—),男,本科,研究员,主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: 83848384@sina.com.cn

(通信联系人)

空间滤波器可以很好地对低频和高频成份进行校正和控制,但对中频段缺少有效的控制手段,须在加工过程中予以限制。综合光学元件的检测手段,加工现状和其传输特性以及对焦斑旁瓣的物理需求,NIF 将波前功率谱密度(PSD)技术指标作为在加工过程中中高频误差检测标准,具体要求可以参看文献[3]。

在神光 II 升级装置中,由于大口径光电开关 KDP 晶体在加工过程中残留有不同周期的调制刀纹,从而引入了中高频成份,且该调制要明显高于其他类元件,对装置输出性能存在明显的影响。本文对 KDP 晶体和典型钹玻璃片的中高频的功率谱进行分析 and 比较,然后对整个装置进行数值模拟,定量研究该中高频波前调制对光束近场均匀性和聚焦能力的影响。

## 2 钹玻璃片和 KDP 晶体中高频段波前的比较

NIF 用功率谱密度来描述光学元件的中频段加工误差<sup>[4]</sup>,对给定元件的一维面型分布  $z(x)$ ,  $x$  为空间坐标,其谱函数即为其傅里叶变换

$$Z(k) = \int_0^L dx z(x) \exp(-jkx), \quad (1)$$

式中  $k=2\pi\nu$  为波数,式中  $\nu$  为空间频率。

功率谱密度定义为

$$f_{\text{PSD}} = \frac{|Z(k)|^2}{L}. \quad (2)$$

经离散化处理可得 PSD 的数值计算公式为

$$f_{\text{PSD}} = \frac{|Z(m)|^2}{N\Delta x} = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp(-2\pi jnm/N) \right|^2, \quad (3)$$

式中  $\Delta x$  为采样点距离,  $N$  为采样点数,  $L = N\Delta x$ ,  $x = n\Delta x$ ,  $\nu = m/(N\Delta x)$ 。

在神光 II 升级装置中,主放装置采用厚度为 45 mm 的钹玻璃片,以布儒斯特角放置,可测得典型钹玻璃片在 1053 nm 波长下的一维波前,在对其进行 33 mm 高通滤波之后,其功率谱密度分布可由(3)式计算得出,在对数坐标下的分布见图 1(a),其中斜线为 NIF 所规定的 PSD 曲线,其方程为

$$f_{\text{PSD}} = 1.05\nu^{-1.55}. \quad (4)$$

由图 1(a)可知,钹玻璃片中频区较低频段频率成分比较单一,较高频段也整体位于曲线以下,基本满足 NIF 的给定标准。而在 Zygo 干涉仪采集的 KDP 波前数据中,进行 33 mm 高通滤波,得到该频段调制最大幅度为 38 nm, RMS 值为 9.233 nm,在采样 30 线对后,所得平均 PSD 分布如图 1(b)所示,可明显看出中频区频谱成份非常丰富,整体分布超出 NIF 规定曲线,在  $0.045 \text{ mm}^{-1}$  处存在明显峰值,且  $0.1 \text{ mm}^{-1}$  处也存在峰值。在神光 II 装置中,位于  $0.1 \text{ mm}^{-1}$  处的波前峰值属于高频调制,可以由空间滤波器小孔滤除,但在高通量情况下可能会形成堵孔;而位于  $0.045 \pm 0.02 \text{ mm}^{-1}$  处的波前峰值属于中频调制,可以顺利过孔,影响光束近场均匀性,并产生旁瓣从而影响焦斑形态。这种中高频成分来源于 KDP 晶体金刚石车床飞切抛光所形成的周期性刀纹调制<sup>[5]</sup>,其调制幅度比环抛工艺加工的钹玻璃片(最大调制幅度为 7.4 nm)大了 1 个数量级,相应 RMS 值比钹玻璃片(RMS 值为 1.546 nm)大了近 6 倍。通过以上分析可以知道,大口径电光开关晶体的波前调制,在整个放大链路的中高频波前信息中占有相当大的比重,有必要针对升级装置建立模拟计算程序进行详细的研究。

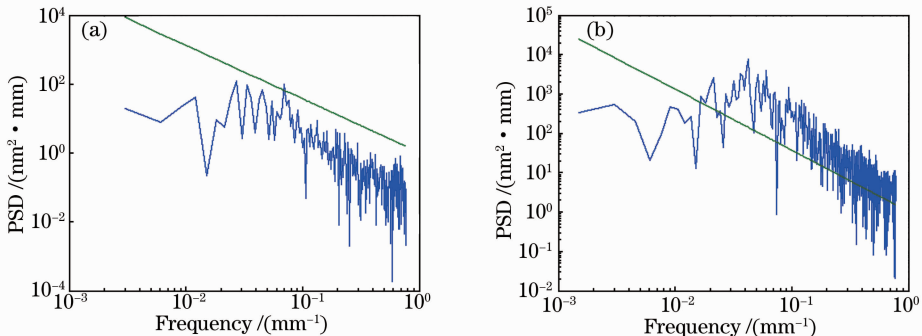


图 1 (a)典型钹玻璃片和(b)KDP 晶体的 PSD 分布  
Fig.1 PSDs of (a) Nd:glass slab and (b) KDP crystal

### 3 理论分析

#### 3.1 光路结构

基于快速傅里叶变换(FFT)和角谱传输理论对整个放大链路进行数值模拟,分析 KDP 晶体表面刀纹调制带来的影响,重点关注放大过程中空间滤波器小孔处的光强分布和近场光强均匀性。神光 II 升级装置主放大器光路结构如图 2 所示<sup>[6]</sup>,来自预放的注入光束,经传输空间滤波器 TSF-1 孔注入助推放大器(PA)进行首次放大,后由 RM1、RM2 两面 45°反射镜反射以 p 偏振方式到达偏振透反镜 P1,由于 P1 对 p 偏振高反而对 s 偏振高透,所以会将入射光束完全反射,通过开关晶体(PEPC)与腔空间滤波器(CSF),并首次通过片放大器(CA)完成第一程放大,随后经变形镜(DM)反射回腔放大器进行第二程放大,此时,PEPC 施加电压,改变光束偏振态,使其由 p 偏振变为 s 偏振,从而通过透反偏振镜。当光束经腔镜 CM1 反射再次通过 PEPC 时,偏振态重新变回 p 偏振态,在完成第 3、第 4 程放大之后,由于 PEPC 开关已退压,光束经由 P1 返回助推放大器进行放大,并最终通过 TSF-4 孔径 TSF 输出透镜传输到靶场。

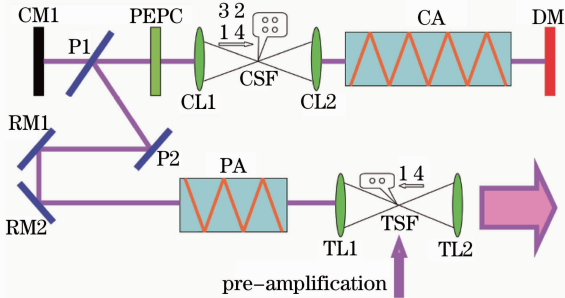


图 2 神光 II 升级装置主放大器光路结构示意图

Fig. 2 Main amplifier of SG - II updated laser facility

模拟中,光束起始位置为助推放大器,注入光束为半峰全宽为 14.5 cm 的 20 阶超高斯分布,波长  $\lambda = 1053 \text{ nm}$ ,注入能量为 4 J,助推放大器小信号增益系数  $g_1 = 0.042 \text{ cm}^{-1}$ ,腔放大器小信号增益系数  $g_2 = 0.0427 \text{ cm}^{-1}$ ,饱和能密度为  $E_s = 4.7 \text{ J/cm}^2$ ,CSF 的 4 个小孔直径尺寸分别为: $\Phi_1 = 1.67 \text{ mm}$ 、 $\Phi_2 = 1.7 \text{ mm}$ 、 $\Phi_3 = 1.9 \text{ mm}$ 、 $\Phi_4 = 2.4 \text{ mm}$ ,TSF-4 孔  $\Phi = 3.5 \text{ mm}$ 。这里要特别说明的是,在实验中,DM 在校正低频动态波前像差时需要较大的预补偿量,会对 CSF-1 孔和 CSF-2 孔处的过孔产生较大影响,因此整体优化后,对 CSF 小孔尺寸进行了修正,而这一改变在此次模拟过程中并未予以考虑。模拟得到基频输出近场光强分布结果如图 3 所示,图中可

清晰看到近场中的弧形 KDP 刀纹调制,与实验中近场测量(图 4)所得条纹周期相同,均为 22 mm 左右,与 KDP 晶体表面 22 mm 周期性中频相位调制相吻合。

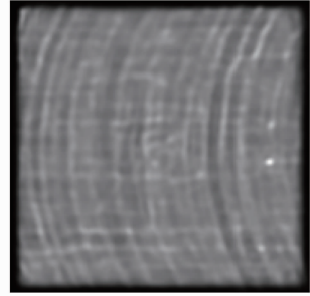


图 3 模拟得到的近场结果

Fig. 3 Near-field result by calculation

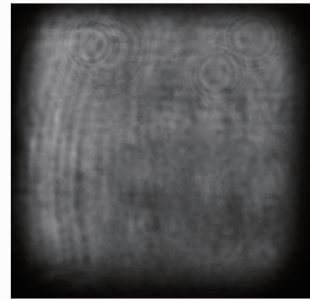


图 4 实验中 CCD 采集的近场数据

Fig. 4 Near-field data collected by CCD

#### 3.2 中频波段波前调制对近场均匀性和远场聚焦能力的影响

NIF 用对比度  $C$  来定量分析光强的均匀性,其定义为光束截面处光强分布的均方根除以其平均值<sup>[7]</sup>,即  $C = I_{\text{RMS}}/I_{\text{average}}$ 。表 1 和图 5 为在有无 KDP 晶体情况下,TSF 近场输出的模拟结果。

表 1 有无 KDP 晶体情况下的 TSF 输出结果

Table 1 Outputs at TSF with and without KDP crystal

	With KDP	With out KDP
$I_{\text{max}}/(10^9 \text{ W/cm}^2)$	4.4274	3.6230
$I_{\text{average}}/(10^9 \text{ W/cm}^2)$	3.1985	3.2538
$I_{\text{RMS}}/(10^8 \text{ W/cm}^2)$	3.3351	1.1298
Contrast	0.1043	0.0347
95% energy	13.74 DL	11.77 DL

由表 1 可知,当考虑 KDP 晶体的波前调制时,95% 的能量集中在 13.74 倍衍射极限(DL)内虽然和无 KDP 的情况相差不多,但对比度相差了近 3 倍。在实际光路中,当光束第一次经 KDP 晶体通过空间滤波器时,低于小孔截止频率的分量通过小孔,而高于小孔截止频率的部分将会被小孔板滤除。对于 CSF-1 孔,直径  $\Phi_1 = 1.67 \text{ mm}$ ,其空间截止频率公式为

$$\nu_r = \frac{\Phi_1}{2f\lambda}, \quad (5)$$

式中  $f$  为空间滤波器 CSF 透镜焦距, 由此可求得其截止频率为  $0.0667 \text{ mm}^{-1}$ , 而晶体刀纹频率为  $0.045 \text{ mm}^{-1}$  左右, 小于小孔截止频率从而会通过小

孔, 根据衍射积分理论, 在传输过程中相位与振幅相互作用, 波前相位对光强分布产生调制, 过孔前后光束截面的光强分布如图 6 所示。

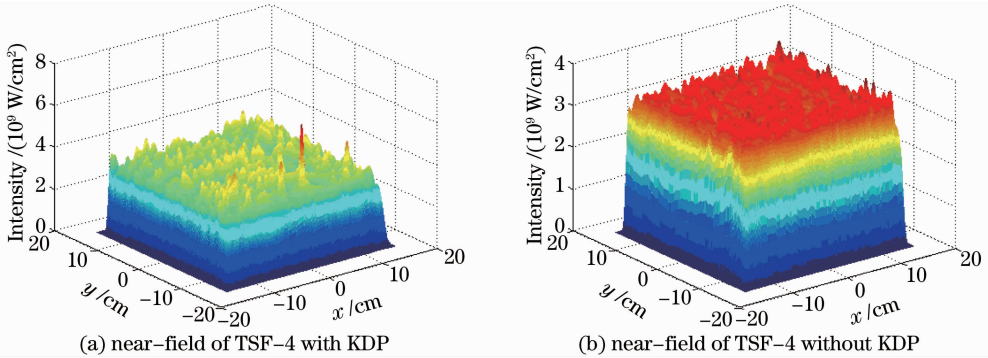


图 5 有无 KDP 晶体情况下的模拟 TSF-4 输出近场  
Fig. 5 Calculated near-fields of TSF-4 with and without KDP crystal

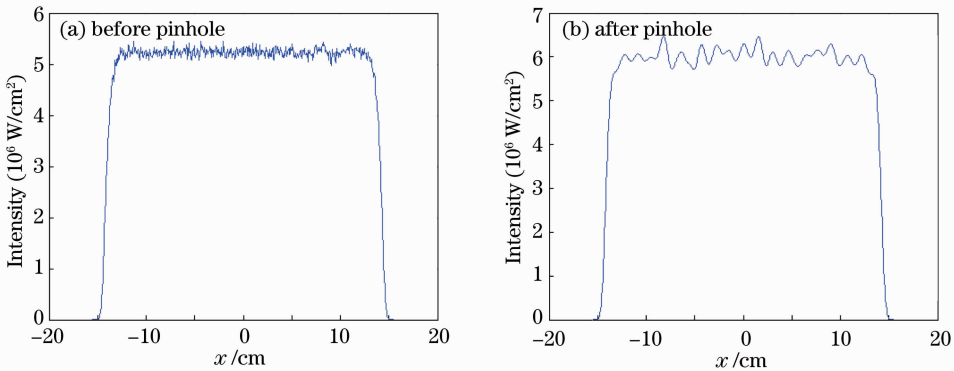


图 6 过孔前后光束截面处的光强分布  
Fig. 6 Intensity distributions at beam transversal surface before and after pinhole

随着多次通过光学元件和衍射传输, 此调制引起的光强对比度将会变得越来越大, 并在远场形成旁瓣, 光束通过各个滤波器之后的近场光强调制度即峰均比和对对比度如表 2 所示。

表 2 不同空间滤波器处的光强对比度和调制度  
Table 2 Contrasts and modulations at different spatial filters

Spatial filter	Modulation	Contrast
CSF-1	1.0878	0.0223
CSF-2	1.0821	0.0208
CSF-3	1.2724	0.0525
CSF-4	1.1907	0.0441
TSF	1.3842	0.1043

KDP 晶体光束质量就会下降, 近场光强对比度会不断增大, 并在传输滤波器 TSF 处达到最大值。在模拟中, 对 KDP 晶体刀纹加深的情况也做了分析, 当 KDP 晶体调制刀纹加深时, 根据(2)式, 其中高频功率谱密度也会增加, 计算表明, 在通过 CSF-1 孔时, 光强对比度和调制度与中高频调制深度成线性增加, 如图 7 所示。

由图 7 和表 2 可知, 中频波段调制的加深使得近场均匀性和远场聚焦能力进一步变差, 下面给出了原始调制下 TSF 输出近场与调制幅度增加到  $190 \text{ nm}$  时的 TSF 输出近场对比图(如图 8、9 所示), 近场光强对比度由原始调制下的  $0.1043$  变为  $0.3056$ 。

表 2 说明, 在 4 程放大过程中, 每当再次通过

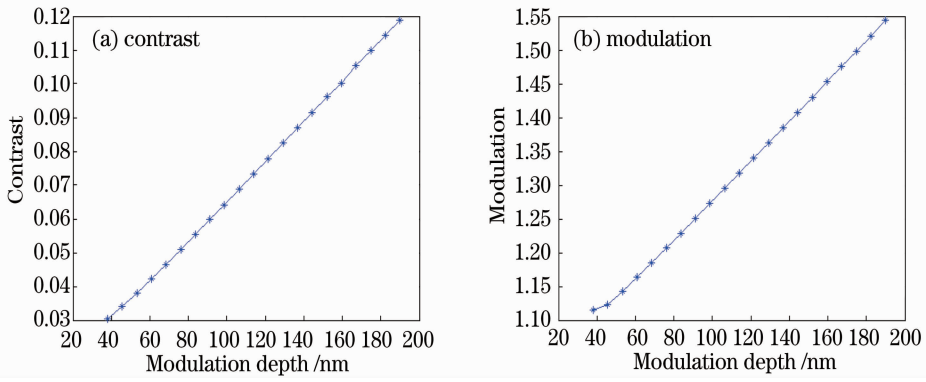


图 7 中高频调制加深时光束通过 CSF-1 后的变化

Fig. 7 Variations after CSF-1 when middle and high frequency perturbation increases

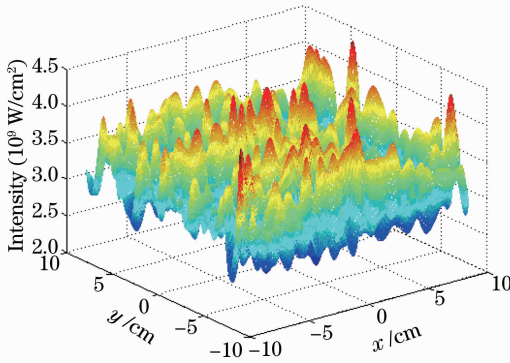


图 8 原始调制的近场( $C=0.1043$ )

Fig. 8 Original near-field ( $C=0.1043$ )

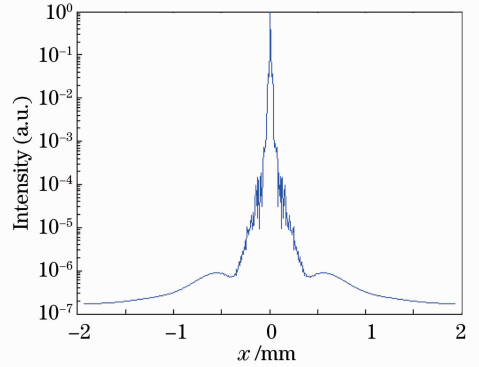


图 10 原始调制的远场

Fig. 10 Original far-field

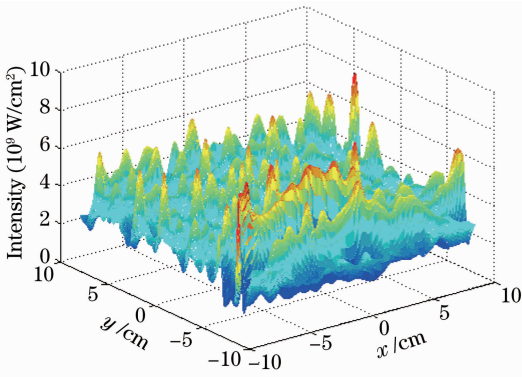


图 9 调制幅度增加时的近场( $C=0.3056$ )

Fig. 9 Near-field when perturbation increases ( $C=0.3056$ )

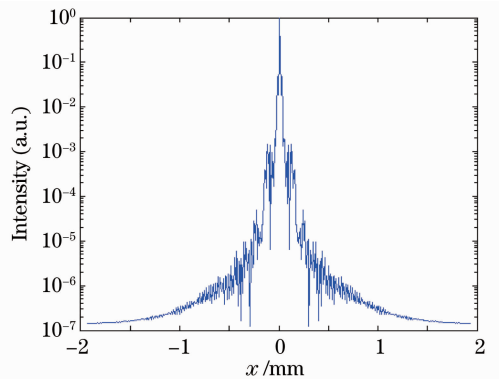


图 11 调制幅度增加时的远场

Fig. 11 Far-field when perturbation increases

对上面两种情况得到的 TSF 输出波前分别计算焦距为 2234 mm(靶场聚焦透镜)时的远场情况,其光强为归一化光强,如图 10 和图 11 所示。两远场光强分布均在 0.1 mm 处出现峰值,与  $0.045 \text{ mm}^{-1}$  处的中频调制相对应,光强相差一个量级以上,并且随着调制幅度增大,旁瓣愈发明显。

研究表明<sup>[8]</sup>,在三倍频转换过程中,对近场注入光束的波前均匀性与振幅的空间均匀性都有很高的

要求,当基频光强较小时,基频光的振幅调制对三倍频光的相位扰动较小,而当基频光强较大时,基频光的振幅调制对三倍频光的相位扰动明显增大,而当 中频波段相位扰动增大时,基频光的振幅调制也越加明显,所以在激光放大链路中要积极避免引入中频段的周期性相位扰动。

### 3.3 中频波段波前调制对激光束过孔的影响

在激光传输放大过程中,CSF-4 孔因为其位于片放第 4 程放大之后,尺寸又小于传输滤波器的输



出小孔,从而承担了较大压力。如果在小孔边缘附近处的光强过高,则会对小孔板形成烧蚀,有等离子体喷溅形成堵孔。CSF-4孔直径为2.4 mm,根据(4)式可求得截止频率为 $0.1\text{ mm}^{-1}$ ,而晶体刀纹频率为 $0.045\text{ mm}^{-1}$ 左右,小于小孔截止频率从而会通过小孔,计算结果表明,如果未对高频段波前加以限制,在4 J注入的情况下,CSF-4孔边缘光强在1.28 mm处存在峰值 $5.5\times 10^{10}\text{ W/cm}^2$ ,对应KDP波前调制频率为 $0.11\text{ mm}^{-1}$ ,与KDP的PSD曲线中 $0.1\text{ mm}^{-1}$ 的小峰吻合,该频率大于小孔截止频率,因此不会通过小孔而是打在小孔侧边上。当中高频波前调制增加时,CSF-4孔附近的光强也会随调制幅度加深而增长,由计算可知,该通量下,当中高频分量调制幅度达到158 nm时,距小孔中心1.28 mm处光强达到 $10^{12}\text{ W/cm}^2$ ,将会产生严重的堵孔,所以一定要加以控制。

## 4 结 论

大口径电光开关KDP晶体在整个激光器放大链路中是引入中高频段调制的重要因素,在对整个放大链路模拟的基础上,对KDP晶体波前中高频波段影响进行了分析和模拟,由模拟结果可知刀纹的调制深度对输出光束的均匀性及其聚焦能力有着非常严重的影响,随着刀纹深度的增加,光束近场均匀性会逐渐下降,远场光斑的旁瓣愈加明显,并且其峰值功率将不断增强,过深的刀纹可能会造成堵孔,因此在晶体加工中,必须要对其加以限制。

致谢 感谢光学检测小组提供的神光II升级光学元件的相关波前数据。

## 参 考 文 献

- 1 J K Lawson, J M Auerbach, R E English Jr, *et al.*. NIF optical specifications the importance of the RMS gradient[C]. SPIE, 1999, 3932: 336-342.
- 2 Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1625-1634.  
姜文汉, 杨泽平, 官春林, 等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625-1634.
- 3 D M Aikens, A Roussel, M Bray. Derivation of preliminary specifications for transmitted wavefront and surface roughness for large optics used in inertial confinement fusion[C]. Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion (ICF). International Society for Optics and Photonics, 1995. 350-360.
- 4 J M Elson, J M Bennett. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. Appl Opt, 1995, 34(1): 201-208.
- 5 Ji Lailin, Liu Chong, Tang Shunxing, *et al.*. Phase perturbation of large aperture KDP crystal manufacture and effects on third harmonics generation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 39(5): 68-72.  
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, 2009, 39(5): 68-72.
- 6 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Wavefront propagation modeling and verification of the SG-II updated laser facility[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0214001.  
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 神光II升级装置波前传输计算模型与验证[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0214001.
- 7 M L Spaeth, K P Manes, C C Widmayer, *et al.*. National ignition facility wavefront requirements and optical architecture[J]. Opt Eng, 2004, 43(12): 2854-2865.
- 8 J M Auerbach, D Eimerl, D Milam, *et al.*. Perturbation theory for electric-field amplitude and phase ripple transfer in frequency doubling and tripling[J]. Appl Opt, 1997, 36(3): 606-618.

栏目编辑:张 腾