

高功率激光装置终端楔形透镜的测量与调试

邵平¹ 夏兰² 赵东峰¹ 居玲洁¹ 焦兆阳¹

¹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

²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 楔形透镜是高功率激光系统终端光学组件的关键元件,也是较为特殊的光学元件,楔形透镜的楔角测量关系着高功率激光的聚焦性能。终端组件中楔形透镜的加工角度、工作姿态一旦偏离了特定的工作角度,终端组件会引入大的面形偏差,楔形透镜特殊的形状不利于楔形透镜面形、楔角的测量。提出了一整套楔形透镜测量调整方案,包括楔形透镜加工过程中的测量方案,楔形透镜安装过程中的离线测量与调整方案,以及终端组件上线调试过程中的在线调试测量方案。该套方案的实施能够保证楔形透镜的加工精度,及组件中楔形透镜能够工作在最佳工作姿态,保障了高功率激光系统终端组件的光束质量和定位精度。

关键词 光学器件;高功率激光装置;终端光学组件;楔形透镜;楔角误差;塔差

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0408006

Measurement and Debugging of Wedge-Shaped Lens in High Power Laser Facility

Shao Ping¹ Xia Lan² Zhao Dongfeng¹ Ju Lingjie¹ Jiao Zhaoyang²

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract The wedge-shaped lens is the key and special optical component of the final optics assembly (FOA) in high power laser facility. The wedge-shaped lens wedge angle measurement plays a remarkable role in focusing performance of high power laser. If processing angle and work attitude of the wedge-shaped lens deviate from the specific work angle, big surface deviation will be introduced into the FOA. Special shape of the wedge-shaped lens is not conducive to the measurements of the transmission profile and wedge angle. A set of wedge-shaped lens measurement adjustment programmes is proposed, including measurement of the wedge-shaped lens in processing process, and off-line measurement of wedge-shaped lens during alignment and on-line measurement during the debugging process. The scheme can ensure the processing precision and working attitude of the wedge-shaped lens, guarantee the beam quality and the positioning accuracy of the FOA components of high power laser system.

Key words optical devices; high power laser facility; final optics assembly; wedge-shaped lens; wedge angle error; tower error

OCIS codes 230.4040; 350.4600; 140.3580

1 引言

为开展高能量密度物理和激光惯性约束聚变研究^[1-5],各国纷纷建造兆焦耳高功率激光驱动器,如美国国家点火装置(NIF)^[6]和我国的神光系列装置^[7]。兆焦耳高功率激光驱动器通常由多路激光构成,利用钨玻璃作为增益介质,采用多程放大技术,获得兆焦耳级的能量输出^[7,9]。装置末端的终端光学组件(FOA)^[7]将激光波长从 1053 nm 转换至 351 nm,聚焦至真空靶室靶点,获得 10^{14} W/cm² 以上的聚焦功率密度^[9-10]。终端光学组件是高功率激光驱动器的核心单元之一,可以实现激光频率转换,完成激光聚集和精确定位,提供各种极端状态的实验条件^[10-12]。为实现多路高功率激光束联合打靶,各高功率激光装置靶镜采用各种不同的透镜或者

收稿日期: 2014-10-10; 收到修改稿日期: 2014-12-05

作者简介: 邵平(1961—),男,高级实验师,主要从事激光装置器件方面的研究。E-mail: Shaoping_sp@163.com

透镜组合。随着高功率激光器的束数与能量的增加,靶场光学元件数量、各种控制测量机构会成倍增加,为节约靶场空间,减小系统 B 积分,提高通光孔径,大口径楔形透镜成为最新趋势(美国NIF装置和神光II、III装置均采用了楔形透镜结构),可保证百微弧度的靶面范围内聚焦驱动器的95%能量。相比于普通透镜,楔形透镜透过波前对透镜工作姿态比较敏感。但由于楔形透镜楔角加工、测量、安装调试没有形成成熟完善的测量方案,高功率激光装置的打靶质量会受到一定的影响。

本文针对高功率激光装置提出了一整套楔形透镜的测量调整方案,包括加工过程中楔形透镜楔角定位控制方案,终端系统安装过程中离线测量安装方案及终端上线调试过程中楔形透镜在线调整方案。该方案已在高功率激光驱动器上实验实施,取得了初步的结果,证明了该方案的可行性。

2 理论分析

楔形透镜在终端组件中的主要功能是光束聚焦与谐波分离,如图1所示,因此简单看来,楔形透镜是一个平凸透镜与一个棱镜的合体,作为多数高功率激光装置终端靶镜,将多束激光中的各束激光会聚于同一个焦点的同时,能够将三倍频激光与基频激光分离。

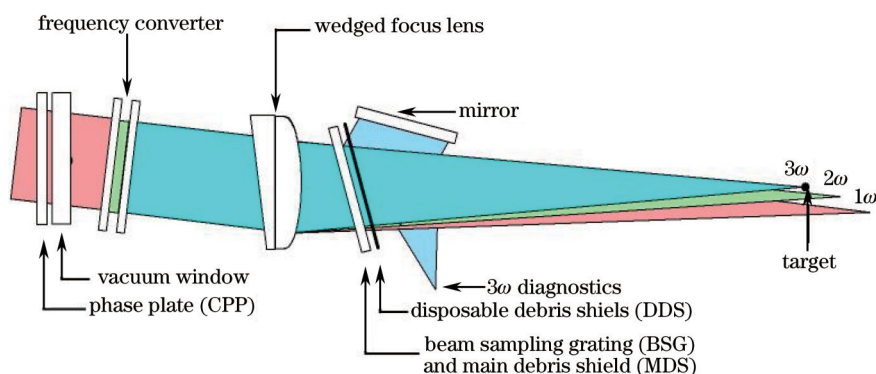


图1 高功率激光装置终端光学组件

Fig.1 Final optical assembly in high power laser facility

如图2所示,楔形透镜也可看成一个大口径平凸透镜,与普通透镜不同的是,在光路中这个平凸透镜的主轴与光束的光轴有一个比较大的夹角。图2是楔形透镜工作光路的俯视图(水平截面图), O 点为光束焦点(或靶点), OO' 为曲面 S 过焦点 O 点的一根法线,面 A 为曲面 S 过 O' 点的切面,面 B 为平凸透镜的平面,那么楔形透镜楔角定义为面 A 在水平截面上投影线与面 B 在水平截面上投影线之间的夹角 θ 。

图3是楔形透镜汇聚光路侧视图,定义楔形透镜塔差为面 A 在垂直截面上的投影线与面 B 在垂直截面上的投影线之间的夹角。在理想工作状态下,塔差为0,而实际应用中,因为加工或者安装误差,塔差不一定为0。在实际测量中,塔差的存在可以通过楔形透镜绕 OO' 轴旋转,转化为楔形透镜楔角偏差,因此楔形透镜最终考核指标为楔角偏差与透过面形^[11,13-14]。

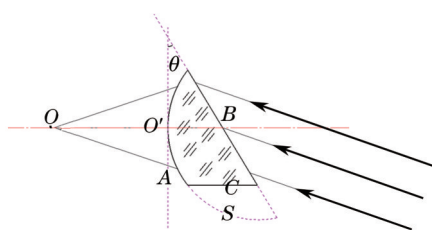


图2 楔形透镜俯视图

Fig.2 Top view of wedge-shaped lens

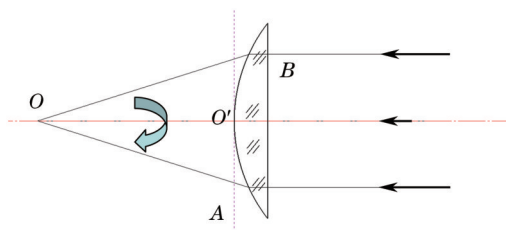


图3 楔形透镜侧视图

Fig.3 Side view of wedge-shaped lens

3 加工过程中的楔角偏差控制

图2中,切面 A 是一个非实际存在的平面,不可作为实际测量中的基准面,因此没有基准面的楔角测量

比较困难。加工过程中,若选择一个实际面作为基准面来加工测量楔形透镜,比如C面,在实际装调过程中,如果存在C面基准传递误差,则会加入了新的楔角偏差 $\Delta\theta$,最终引起透过面形变大。如图4所示,当楔形透镜俯仰方向旋转一个角度,焦点变为 O_1 ,那么通过 O_1 的曲面S的法线落点 O'_1 随之变化,楔形透镜工作楔角变成 θ_1 。因此C面只能作为加工过程中的一个辅助基准面,测量基准的传递通过制作标准棱镜块来实现。

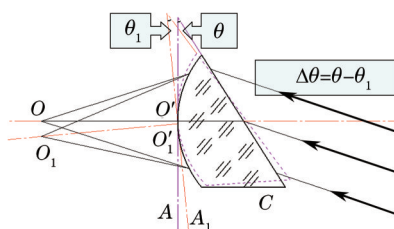


图4 楔形透镜楔角失调

Fig.4 Wedge angle misadjustment of the wedge-shaped lens

预先加工一块标准楔角的棱镜,如图5(a)中的棱镜L。棱镜的3个面 A_L 、 B_L 、 C_L 对应楔形透镜的切面A、平面B和C面。将棱镜放于六维调整平台K上,四维(4D)干涉仪细光束在 A_L 面上原光路返回,平行光管对面 B_L 准直。此时平行光管光轴与4D干涉仪光轴所成锐角等于标准棱镜楔角。

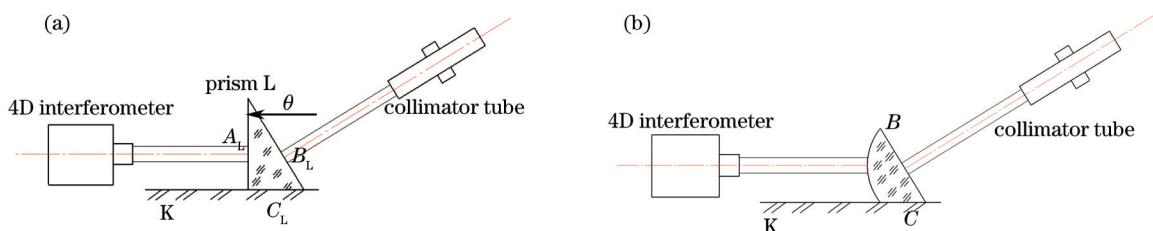


图5 楔形透镜测量定位。(a) 标准楔角的棱镜; (b) 加工中的楔形透镜

Fig.5 Measurement and location of the wedge-shaped lens. (a) Prism with standard wedge angle; (b) wedge-shaped lens in processing

将加工中的楔形透镜替代棱镜,如图5(b)所示。调整六维调整平台机构,使得4D干涉仪光束及平行光管光束仍延原光路返回,此时楔形透镜处于无楔角偏差的工作姿态。

4D干涉仪加上会聚物镜头,光束焦点落在楔形透镜焦点上,标准镜 M_1 在楔形透镜后将平行测量光延原光路返回,组成如图6所示的干涉测量光路。测量此时的楔形透镜面形可给加工者作为面形参考。或者调整楔形透镜使其达到最小透过面形,用平行光管测量此时面B的偏差,就是楔形透镜加工过程中的楔角偏差与塔差,可作为角度加工参考。

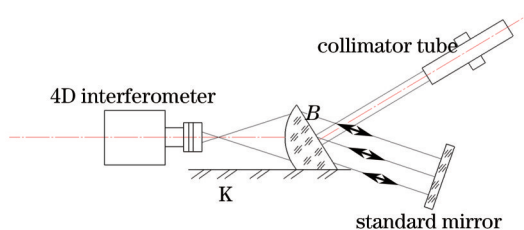


图6 楔形透镜的干涉测量光路

Fig.6 Interference measurement of wedge-shaped lens

4 离线安装方案

通过上一节中描述的测量控制方案加工出来的楔形透镜在工作楔角为 θ 时面形最佳,但在安装过程中,楔形透镜姿态相对靶点若有偏差,工作楔角将发生变化如图4所示,使得楔形透镜透过面形变差。因此安装过程中,必须采用与上一节相似的测量光路来安装调试楔形透镜,如图7所示。将标准棱镜装入终端靶镜位置,自准直平行光管1处于靶镜焦点位置,沿着终端光轴,调整靶镜调整机构,使得棱镜L面 A_L 与自准直平行光管1准直,再安装平行光管2准直面 B_L 如图7(a)所示。取下棱镜安装楔形透镜,如图7(b)所示。调整楔形透镜,使两个平行光管的光束都能准直回去。此时楔形透镜光轴与终端光轴重合,且工作在标准楔角姿态下。

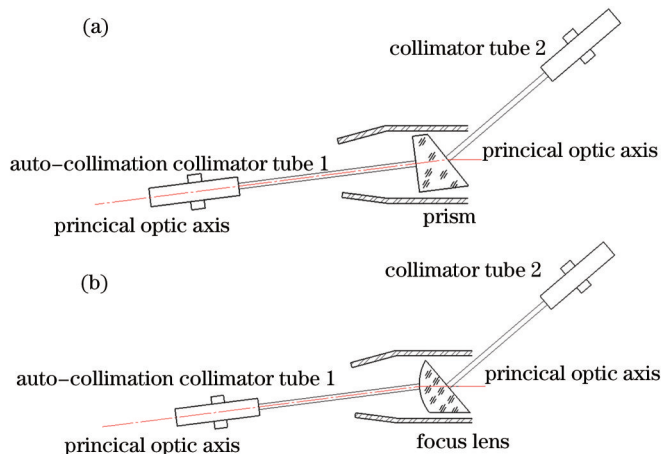


图7 楔形透镜离线定位调整。(a) 标准棱镜; (b) 楔形透镜

Fig.7 Off-line measurement and location of wedge-shaped lens during alignment. (a) Standard prism; (b) wedge-shaped lens

5 在线调试方案

离线安装完成之后,楔形透镜工作姿态与终端设计方案中一致,但实际使用中却不是最佳姿态。因为实际终端组件不仅包括机械件加工安装误差叠加,还包括了其他光学元件的误差,如各个光学元件的面形偏差叠加。在验收楔形透镜时,为了验证在线调试的必要性,设计了以下实验。

在加工验收实验中,验收光路如图6所示,待验收的楔形透镜加工完成之后,测量得面形PV值为 0.45λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。在图6的平行光路与会聚光路中分别插入若干平行薄板,替代终端中其他元件(如倍频晶体与防溅射板等),模拟整个终端光路。微调整楔形透镜的俯仰、方位角,利用楔形透镜失调可以补偿部分叠加面形偏差,从而改善终端的面形。楔形透镜失调前后系统面形比较如表1所示, $PV_0(\lambda)$ 为改善前测量的终端面形, $PV_1(\lambda)$ 为改善后测量的终端面形。

表1 楔形透镜失调前后系统面形比较

Table 1 Optical surface before and after wedge-shaped lens misadjustment

Number of elements in the convergent path	Number of elements in the parallel path	$PV_0(\lambda)$	$PV_1(\lambda)$
0	2	1.9	1.3
2	2	9.1	1.6
2	2	12.0	1.8
2	2	10.2	1.6

表1中,在平行光路中加入两块薄板,模拟终端的像差主要是彗差,之前楔形透镜的偏差为 0.45λ ,整个模拟终端的像差变为 1.9λ ,通过调整楔形透镜,消除了像差中彗差部分,像差变为 1.3λ 。而表后3行中,在会聚光路插入两块薄板,除了引入可能的彗差之外,还引入了离焦。实验结论表明,在终端最后上线调试中还必须在线调整靶镜,优化终端最终透过面形。

楔形透镜在线调试光路如图8所示,终端安装上靶室之后,在靶室中安装一个4D干涉仪,4D干涉仪的

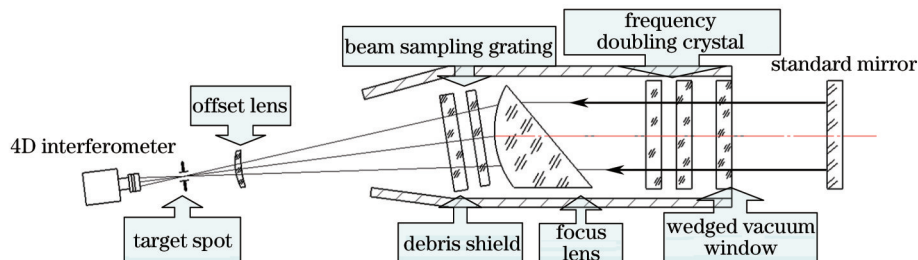


图8 楔形透镜在线调试光路

Fig.8 On-line debugging light path of wedge-shaped lens

平行光束通过一个会聚物镜头聚焦于靶点,通过补偿透镜与终端光学组件后,在标准镜处原光路返回,形成测量光路。测量整个终端的叠加透过面形,微调楔形透镜的俯仰方位角度,利用楔形透镜的微失调补偿部分叠加面形偏差。

在高功率激光装置其中一路终端中实施了该套控制调试方案(见图9),该路终端各个光学元件面形PV值之和约为 3.9λ ,在线调试前测量终端透过面形PV值为 8.38λ (波前见图10),从此时的透过面形可看出终端透过像差包含了较大的彗差,如果不矫正,通过终端光束焦斑会存在“拖尾”现象。在线调试完成之后,终端透过面形PV值为 2.35λ (波前见图11)。

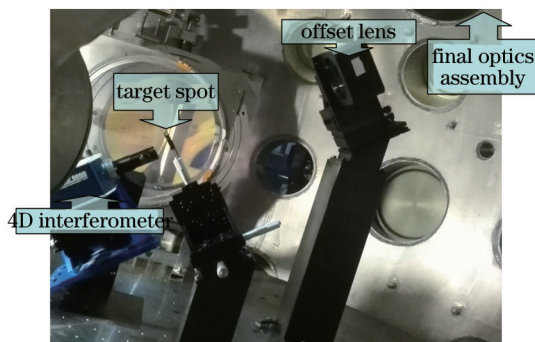


图9 高功率激光装置终端在线调试实例

Fig.9 Example of online debugging of high power laser facility FOA

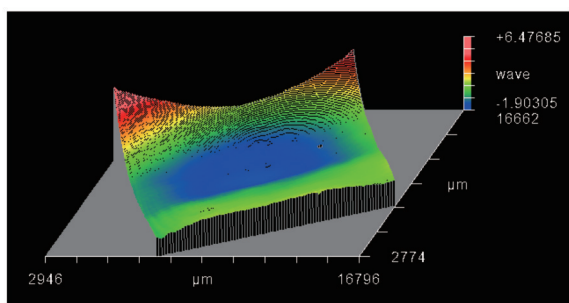


图10 高功率激光装置一路终端在线调试前的透过面形
Fig.10 Transmission profile of high power laser facility FOA before on-line debugging

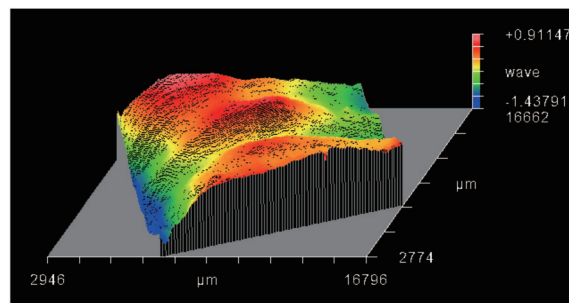


图11 高功率激光装置一路终端在线调试后的透过面形
Fig.11 Transmission profile of high power laser facility FOA after on-line debugging

表2为几组终端系统面形的比较,第一组终端的楔形透镜在加工过程中,没有利用测量控制方案控制楔角加工,楔角偏差 $200''$,按照离线测量方案安装之后的透过波前PV值高达 25λ ,在线调试补偿之后也达到 4.9λ ,与其他几组终端的透过波前比较差了 $1\sim 2\lambda$ 。

表2 几组终端系统面形比较

Table 2 A comparison between transmission profiles of several groups of FOA

FOA	Transmission profile of FOA before debugging	Transmission profile of FOA after debugging
1	25λ	4.9λ
2	8.38λ	2.35λ
3	6.62λ	3.7λ
4	4.9λ	2.7λ

图12是测量方案实施之前高功率激光装置终端组件的小能量焦斑图样,图13是测量方案实施之后的同一路终端组件的小能量焦斑图样。入射靶面与光束成 40° 。该路终端组件在大能量穿孔实验中,3倍频光束穿孔能量比值大于95%。孔靶小孔直径为 $800\mu\text{m}$,孔靶面与光束成 40° 。从图12、13可以看出,终端楔形透镜离线在线测量方案的实施提高了高功率激光装置终端光学组件的聚焦能力。

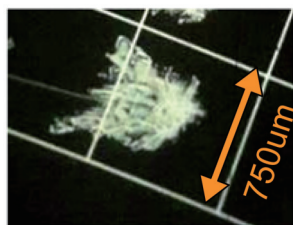


图 12 测量方案实施之前的小能量焦斑图样
Fig.12 Small energy focal spot pattern before the implementation of the measuring scheme

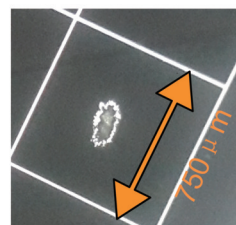


图 13 测量方案实施之后的小能量焦斑图样
Fig.13 Small energy focal spot pattern after the implementation of the measuring scheme

6 结 论

高功率激光装置终端组件楔形透镜中的主要功能是光束聚焦与谐波分离,其特殊的形状使得楔形透镜主要参数楔角测量困难。因此楔形透镜加工过程中楔角误差与塔差的控制、楔形透镜安装调试过程中楔角误差与塔差的测量都成为高功率激光装置终端组件研制的瓶颈。根据高功率激光装置实际打靶需求提出的楔形透镜测量调整方案,解决了楔形透镜加工阶段至安装调试阶段中标准传递的问题,能够全程控制高功率激光装置终端靶镜的加工、测量、安装和调试过程,其包含的3个子方案相辅相成缺一不可。

参 考 文 献

- 1 M H Key. Status of and prospects for the fast ignition inertial fusion concept[J]. *Phys Plasmas*, 2007, 14(5): 055502.
- 2 W Theobald, A A Solodov, C Stoeckl, *et al.*. Initial cone-in-shell fast-ignition experiments on OMEGA[J]. *Phys Plasmas*, 2011, 18(5): 056305.
- 3 J D Zuegel, S Borneis, C Barty, *et al.*. Laser challenges for fast ignition[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49: 453-482.
- 4 W F Krupke. Solid state lasers for application to inertial confinement fusion[C]. SPIE, 1995, 2633: 2-12.
- 5 Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. *Chinese J Laser*, 2010, 37(9): 2202-2207.
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2202-2207.
- 6 G H Miller, E I Mosers, C R Wuest. The national ignition facility[J]. *Opt Eng*, 2004, 43(12): 2841-2853.
- 7 X T He, W Y Zhang. Inertial fusion research in china[J]. *Eur Phys J D*, 2007, 44(2): 227-231.
- 8 Zhang Panzheng, Lin Xianping, Pan Feng, *et al.*. Research of grounding of high power Nd:glass disk amplifier of SG II[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0302004.
张攀政, 林贤平, 潘峰, 等. 神光II高功率钕玻璃片状放大器接地实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302004.
- 9 P Wegner, J Auerbach, T Biesiada, *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- 10 Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, *et al.*. Research status of final optics assembly in high-power laser facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060002.
李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060002.
- 11 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi, *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No.9 system of SG-II laser facility[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702001.
赵东峰, 王利, 林尊琪, 等. 在神光II装置第九路系统开展351 nm波长激光高通量传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0702001.
- 12 Ji Lailin, Liu Chong, Zhu Baoqiang, *et al.*. Analysis of influence of beam smoothing on third harmonic generation in SGII upgrade[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1219002.
季来林, 刘崇, 朱宝强, 等. 神光II升级系统中束匀滑对三倍频的影响分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1219002.
- 13 Qiao Zhanfeng, Lu Xingqiang, Zhao Dongfeng, *et al.*. Arrangement design of the final optics assembly for the SGII upgrading laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(9): 1328-1332.
乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 等. 神光II升级装置终端光学组件的排布设计[J]. *中国激光*, 2008, 35(9): 1328-1332.
- 14 Zhao Dongfeng, Hua Neng, Zhang Ya'nan, *et al.*. Development of final optics assembly for additional beam in SGII laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 245-248.
赵东峰, 华能, 章亚男, 等. 神光II装置第九路靶场终端光学组件的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(2): 245-248.

栏目编辑: 张雁