

doi:10.3788/gzxb20184711.1114002

# 高功率激光装置空间滤波器小孔准直

闫世森<sup>1,2</sup>, 刘代中<sup>1</sup>, 欧阳小平<sup>1</sup>, 龚蕾<sup>1</sup>, 李红<sup>1</sup>, 林强<sup>1</sup>, 唐顺兴<sup>1</sup>, 朱宝强<sup>1</sup>

(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 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**利用新型准直远场探测包光栅元件的双向衍射, 实现了空间滤波器的小孔准直, 特别是对同一段光路中两个空间滤波器的小孔对准. 该方案克服了传统滤波器对小孔尺寸的限制并满足远场准直包高稳定性的要求, 在光路远场准直的同时实现了小孔中心位置的监测与准直调整, 并在以色列项目中得以成功应用. 装置实验结果表明: 针对装置 15 倍衍射极限大小的小孔, 对准精度小于小孔直径 3%, 满足装置器件小孔对准调试小于小孔直径 4% 的要求.

**关键词:**激光技术; 准直; 空间滤波器; 系统设计; 光栅

中图分类号: TP751.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)11-1114002-7

## Spatial Filter Pinhole Alignment on High Power Laser Facility

YAN Shi-sen<sup>1,2</sup>, LIU Dai-zhong<sup>1</sup>, OU-YANG Xiao-ping<sup>1</sup>, GONG Lei<sup>1</sup>, LI Hong<sup>1</sup>,  
LIN Qiang<sup>1</sup>, TANG Shun-xing<sup>1</sup>, ZHU Bao-qiang<sup>1</sup>

(1 *Laboratory of High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China*)  
(2 *University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Using grating diffraction of a new far field alignment package, the spatial filtering pinholes alignment in two spatial filters especially on the same optical path is achieved. This scheme overcomes the shortcomings of pinholes size requirement of traditional method, realizes two pinholes center aligned while maintaining beams far-field alignment function. The new method has been successfully applied to the Israel project. The facility experiment results show that the alignment accuracy is less than 3% of the pinhole diameter which is 15 times of the beams diffraction limit, which meets the requirements of facility debugging (<4% of the pinhole diameter).

**Key words:** Lasers; Collimation; Spatial filtering; Systems design; Gratings

**OCIS Codes:** 140.3460; 120.1680; 070.6110; 220.4830; 050.2770

## 0 引言

随着激光聚变装置在世界上的迅猛发展, 在受限的空间环境下, 要求针对日益复杂和多样化的光路排布和器件要求设计新的可行准直方案. 空间滤波器作为光路中的核心元件, 在激光聚变研究中, 如美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)<sup>[1-3]</sup>, 法国的兆焦耳激光装置(Laser Megajoule, LMJ)<sup>[4]</sup>, 中国的神光 II 升级装置<sup>[5-7]</sup>及以色列国家点火装置(National Laser Facility, NLF)中均大量使用. 典型的空间滤波器由聚焦透镜, 准直透镜和放在这对透镜共同焦点的小孔组成. 滤波器小孔作为控制激光放大过程中的不稳定性的一种手段, 用于去除光束的空间傅立叶模式频谱的翅膀部分, 并只允许较低的空间模式的傅立叶频谱被传输, 也用来降低空间滤波器视角来防止寄生振荡引起的寄生反射、低水平的放大自发辐射及其小尺度自聚焦<sup>[8,9]</sup>. 小孔错位可能导致激光束焦斑和小孔的擦边, 会加剧小孔边缘严重损伤, 严重时造成等离子体形成而

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61605190, 11604317)资助

第一作者: 闫世森(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光自动准直与图像处理. Email: yanshisensos@163.com

通讯作者: 刘代中(1973-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为高功率激光准直和控制. Email: dzhliu@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-08-30

引发的小孔堵塞,输出很差的空间光束质量并引发激光后反射<sup>[10-12]</sup>.所以滤波器小孔对准是高功率激光装置的安装和调试的关键技术和必须步骤.

传统的空间滤波器小孔对准方案,如中国神光 II 装置主要设计原理:在空间滤波器所在光路的漏光反射镜后设置远场成像包,该包可以在 CCD 相机上探测光束焦点(光轴)位置和实现对滤波器小孔的成像,然后通过计算机处理分别获取光斑焦点的位置和小孔中心的位置,最后通过滤波器小孔板的电动马达移动小孔的中心到焦斑的中心,实现小孔和光轴的对准.该方法以 CCD 相机作为远场基准,对整个远场成像包的稳定性要求很高.另外,如果装置(例如以色列项目)有两个空间滤波器在同一段光路时,这种器件排布就不适合传统小孔准直方法.

为了满足以色列项目的滤波器小孔准直要求,本文利用新型准直远场探测包的光栅的双向衍射,实现了空间滤波器的小孔准直,特别是对同一段光路中的两个空间滤波器的小孔对准.该方案克服了传统滤波器小孔对准方法的不足,在满足光路远场准直的同时实现了小孔的对准监测和调整,并在装置上得以成功应用.

## 1 传统滤波器小孔对准原理

传统的滤波器小孔对准方案是通过反射镜漏光取样,通过移入、移出凹透镜,利用激光分别照明两个滤波器小孔,使小孔的轮廓成像在探测器上,通过计算机分析两个小孔的轮廓中心,进行反馈调整实现准直.如图 1 与图 2 所示,传统的滤波器小孔对准步骤为:

1) 首先打开主激光,利用远场透镜和 CCD 相机记录激光焦斑的中心位置(即光轴位置).

2) 如图 1 所示,通过平行导轨移入凹透镜 L2,使得激光发散后把滤波器小孔 H2 完全照满后产生小孔轮廓,该轮廓通过成像光路成像到 CCD 相机上.通过光路后在 CCD 处记录此图像,通过计算机计算中心后反馈控制,使得小孔 H1 轮廓中心与第一步记录的远场焦斑中心对准,从而实现滤波器小孔 H1 的对准.

3) 如图 2 所示,通过平行导轨移出凹透镜 L2、移入凹透镜 L1,使得激光发散后把滤波器小孔 H1 完全照满后产生小孔轮廓,该轮廓通过成像光路成像到 CCD 相机上.通过光路后在 CCD 处记录此图像,通过计算机计算中心后反馈控制,使得小孔 H1 轮廓中心与第一步记录的远场焦斑中心对准,从而实现滤波器小孔 H1 的对准.最后移出凹透镜 L1.

注意此时小孔准直要求滤波器小孔 H2 的大小要大于滤波器小孔 H1 在 H2 处的像,否则 H2 小孔会遮挡滤波器小孔 H1 的轮廓图像,继而造成准直调整误差.

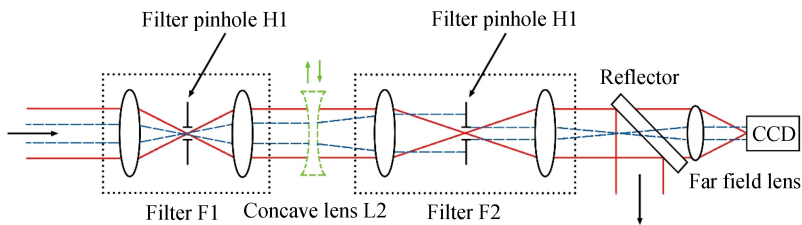


图 1 滤波器小孔 H2 对准光路示意图

Fig.1 Alignment schematic of the spatial filter pinhole H2

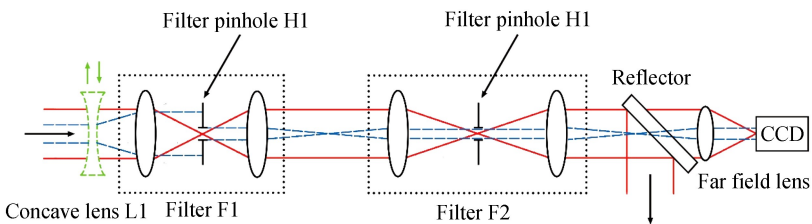


图 2 滤波器小孔 H1 对准光路示意图

Fig.2 Alignment schematic of the spatial filter pinhole H1

## 2 新型滤波器小孔准直技术

由上述原理方法可知,传统的滤波器小孔对准装置以 CCD 相机作为远场基准,对整个远场成像包的稳

定性要求很高.另外,如果装置有 2 个空间滤波器在同一段光路时,该方法对小孔大小也有边界要求:必须保证后面的滤波器小孔 H2 的直径大于前面的滤波器小孔 H1 在后面的小孔 H2 位置所成像的直径,否则这种器件排布就不适合传统小孔准直方法.针对这些问题,本文介绍的新型滤波器小孔对准装置则利用光栅离轴取样,通过光栅的双向衍射,以光栅中心作为远场光轴基准,在完成光路远场准直功能的同时实现了对同一光路中的两个空间滤波器小孔检测与准直调整.

### 2.1 新型远场准直包

新型远场准直包如图 3 所示,主要包括:紧贴在滤波器前的透射光栅,要求光栅比滤波器小孔本身略大;一个光致二极管(LED)照明系统,给光栅提供背景照明;一个 CCD 图像采集系统,安装在光栅一级衍射方向.新型远场准直包在小孔板前方放置经过特殊设计的光栅,利用光栅的衍射特性,实现对远场的在线取样.同时,光栅刻有定位基准,可以在 LED 照明系统和成像系统的帮助下给出系统的远场绝对基准.通过反馈控制系统调整远场控制反射镜,使焦斑的中心和光栅的基准中心重合,即完成光束远场准直<sup>[13-16]</sup>.

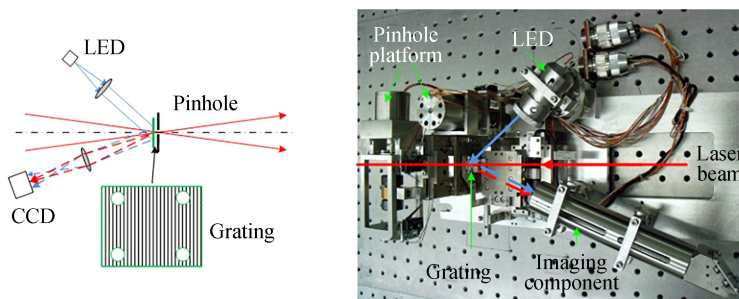


图 3 新型准直探测包示意图与实物图  
Fig.3 New alignment detection package

### 2.2 小孔准直方案

方案实现示意图如图 4、图 5 所示,小孔对准调整方案主要有三个步骤:

1) 光栅与系统光轴对准.首先在光路中紧贴滤波器小孔位置插入光栅,该光栅装有精密电动导轨和位置开关,每次移入定位精度能达到 8 微米,光栅尺寸也大于小孔大小.打开激光器,激光照射到光栅上产生衍射使探测器获取到一个很小的焦斑图像,利用 LED 非相干照明光源照明光栅获得光栅基准中心,调整光路的电动远场反射镜使焦斑中心与光栅中心重合,即完成光栅中心与系统光轴的对准.

2) 获取第一个滤波器小孔图像并进行对准.如图 4 所示,通过滑动导轨在光路前移入凹透镜,光栅产生衍射使探测器获取滤波器小孔 H1 图像,通过计算机计算中心,反馈控制滤波器小孔中心与光栅中心重合,完成第一个滤波器小孔的对准.

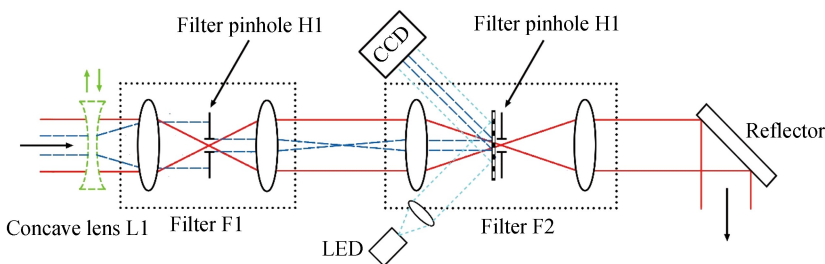


图 4 滤波器小孔 H1 对准光路示意图  
Fig.4 Alignment schematic of the spatial filter pinhole H1

3) 获取第二个滤波器小孔图像并进行对准.如图 5 所示,通过滑动导轨将第二步移入的凹透镜移出,在空间滤波器 F2 后插入凸反镜,使激光经过凸反镜反射后,通过滤波器小孔 H2 射入透射光栅,产生衍射使探测器获取滤波器小孔 H2 图像,通过计算机计算其中心,反馈控制滤波器小孔中心与光栅中心重合,完成第二个滤波器小孔的对准.

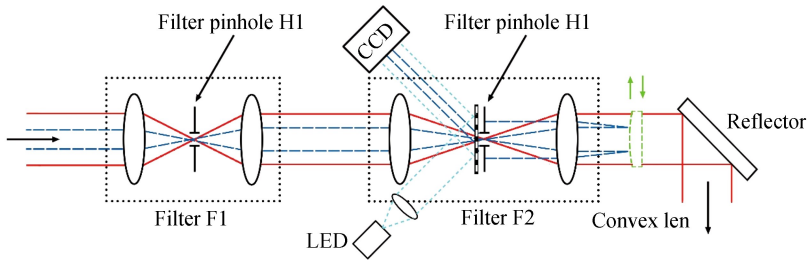


图5 滤波器小孔 H1 对准光路示意图  
Fig.5 Alignment schematic of the spatial filter pinhole H2

### 2.3 实验结果

该方案在中以合作项目以色列项目上实现工程实施和应用<sup>[17-20]</sup>.该装置有 5 路光束,以其中一条光路为例,如图 6 所示,其中空间滤波器 SF2、SF3 在同一段光路中,SF4、SF5 共用另一段光路,这两对空间滤波器的小孔都需要进行准直调试.

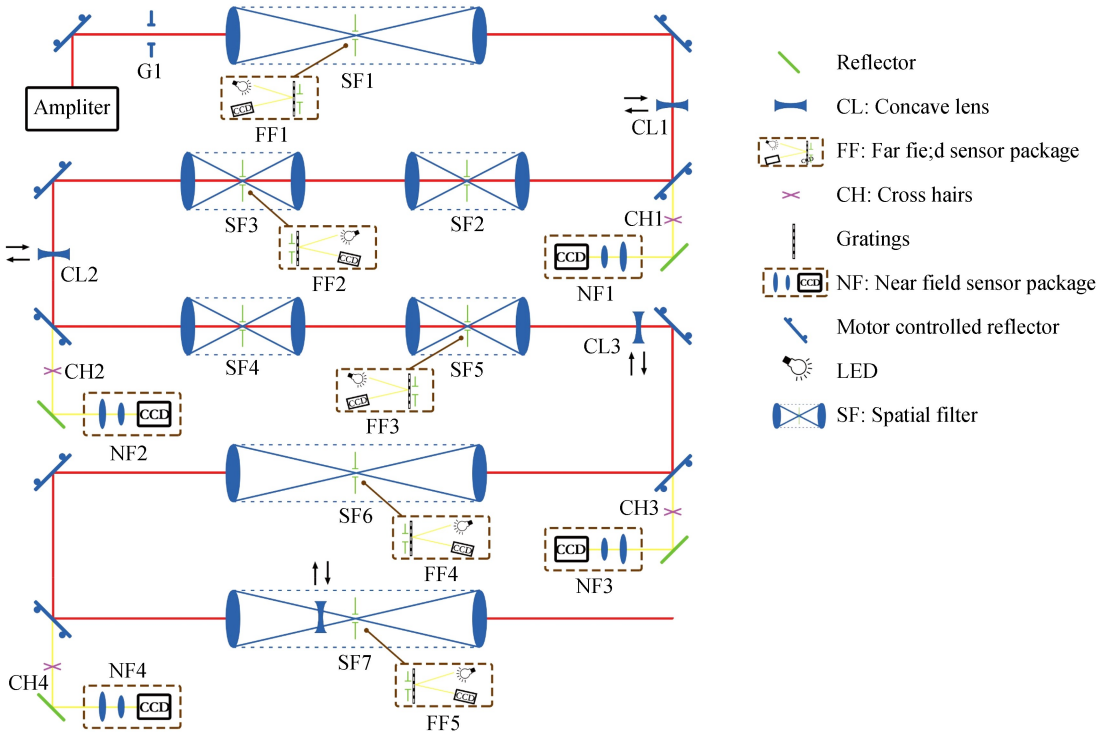


图6 装置运行光路示意图  
Fig.6 Schematic diagram of running path

利用上述实验方案得到的装置滤波器小孔对准图像如图 6 所示.其中图 6 中(a)、(c)、(e)、(g)分别是滤波器小孔 SF2、SF3、SF4 和 SF5,判断中心误差后移动小孔反馈对准得到的结果采样图像,远场准直包成成像比例为 1:1.图 6 中(b)、(d)、(f)、(h)是保存图像后离线利用计算机图像处理后的对应结果.主要图像处理步骤:由光栅刻蚀的定位基准,从左上角对黑色圆孔顺时针编序 1、2、3、4,对四个圆孔进行圆拟合得到中心坐标.光栅基准位置为第 1 个小圆与第 3 个小圆中心连线和第 2 个小圆与第 4 小圆中心连线的交点.

针对图 7 中结果进行分析,通过灰度重心法等算法可以计算出图片中小孔轮廓光斑的中心坐标,通过最小二乘法可以得到小孔半径.得到的分析数据如表 1 所示,其中误差是由光栅基准位置(光轴位置)与测量圆心位置的偏差,除以小孔轮廓直径得到.由表中数据,对准误差小于 3%,满足了装置器件小孔对准调试要求(小于小孔直径 4%).

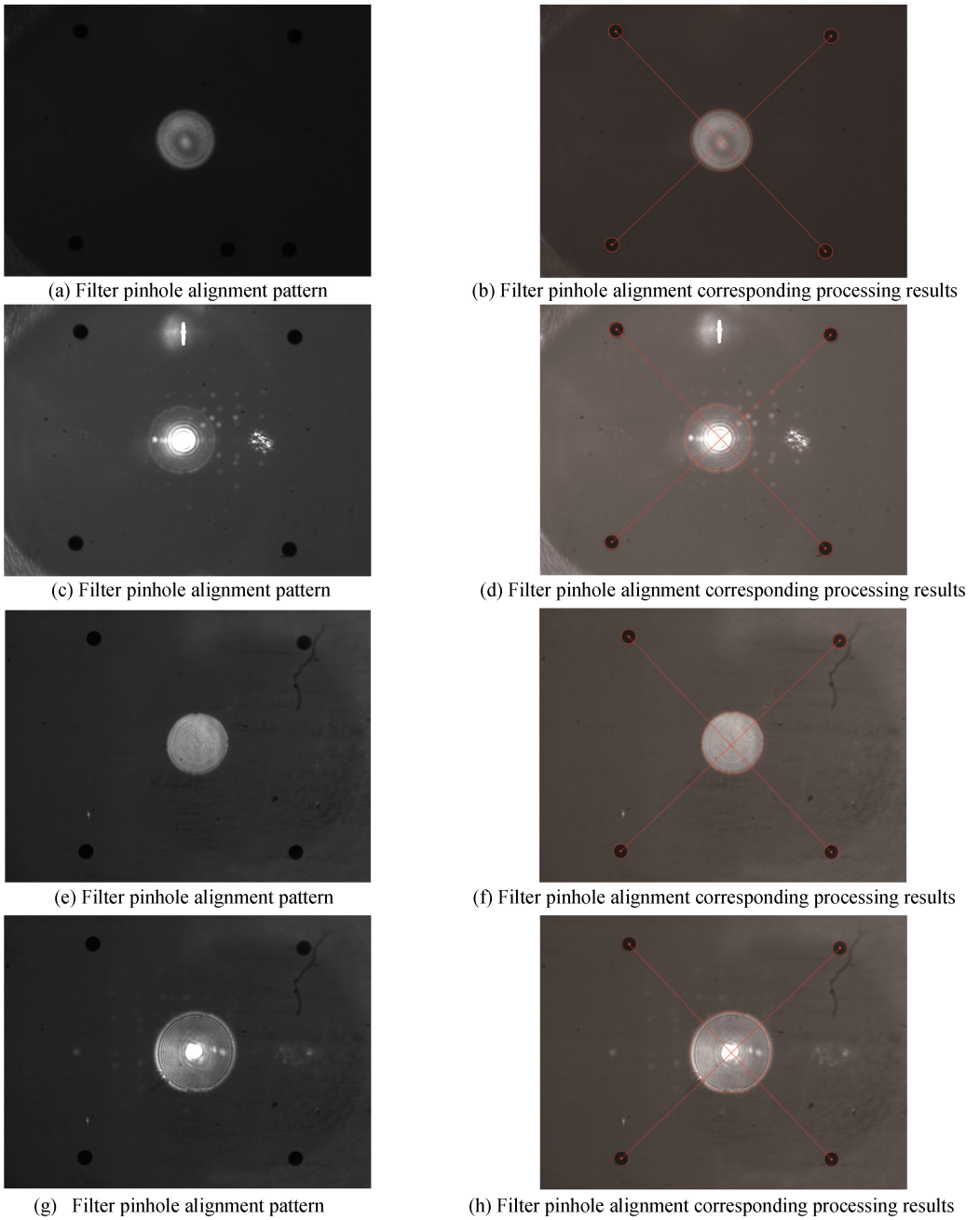


图 7 滤波器小孔对准图样及对应处理结果

Fig.7 Filter pinhole alignment pattern and corresponding processing results

表 1 滤波器小孔对准精度分析

Table 1 Precision analysis of filter pinhole alignment

Items	SF2/pixels	SF3/pixels	SF4/pixels	SF5/pixels
Four grating circles centers	(160.6,58.7)	(162.3,57.9)	(189.6,61.0)	(189.0,60.8)
	(619.5,68.2)	(618.0,69.7)	(639.2,70.1)	(638.2,68.3)
	(607.3,525.6)	(607.5,524.6)	(621.6,517.2)	(620.6,517.3)
	(152.9,511.1)	(152.8,510.3)	(172.5,515.6)	(172.7,515.6)
Reference (intersection points)	(393.8,292.0)	(384.5,290.8)	(407.6,291.2)	(406.5,290.9)
Center of pinhole	(386.1,290.8)	(380.8,290.6)	(410.7,289.2)	(406.2,289.6)
Circle radius	132	141	131	173
Error/%	0.019	0.026	0.028	0.008

图8是装置在该路光束上的基频远场输出结果,输出能量630 J@1 053 nm,脉宽3 ns.可以看到,远场焦斑形态良好,95%的能量集中在5倍衍射极限以内,80%的能量集中在1.2倍衍射极限以内.该结果从侧面证明了滤波器小孔的精确准直状态.

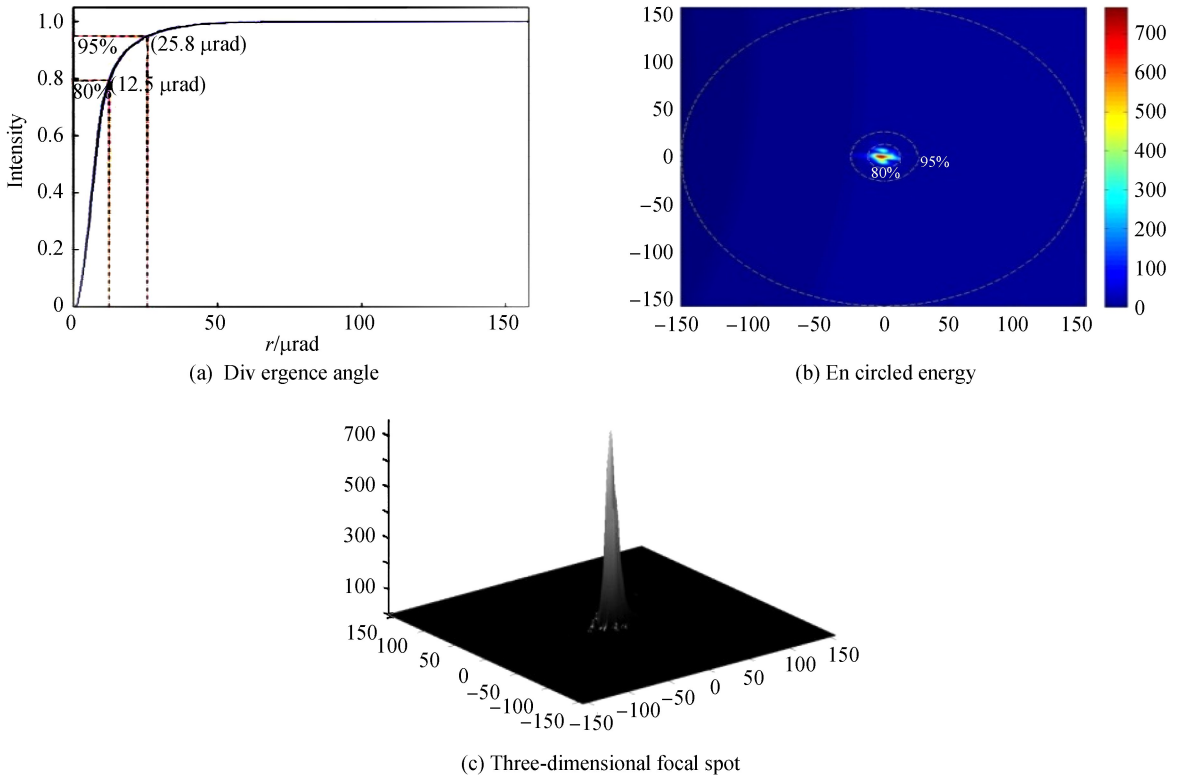


图8 装置基频远场输出  
Fig.8 Far field performance of facility

### 3 结论

针对高功率激光装置滤波器小孔准直要求,特别是同一段光路中的两个空间滤波器,提出了一种基于新型准直远场包光栅元件的双向衍射实现空间滤波器小孔准直的方案.该方案同时包含和兼容了光束远场准直的功能,克服了传统滤波器小孔对准方法的不足:对滤波器小孔尺寸的限制及其对准直远场包高稳定性的要求.该方案在中以合作项目装置上得到应用,小孔准直精度达到小孔直径3%,满足装置滤波器小孔的总体准直要求(<小孔直径4%).

#### 参考文献

- [1] KRUSCHWITZ B E, STOECKL C, MEYERHOFER DD, *et al.* High-energy petawatt capability for the omega laser [J]. *Journal De Physique France*, 2005, **133**(7): 30-36.
- [2] QIAO J, KALB A, GUARDALBEN M J, *et al.* Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems.[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9562-9574.
- [3] AWWAL A A, MCCLAY W A, FERGUSON W S, *et al.* Detection and tracking of the backreflection of potassium dihydrogen phosphate images in the presence or absence of a phase mask.[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(13): 3038-3048.
- [4] FLEUROT N, CAVAILLER C, BOURGADE J L. The Laser Mégajoule (LMJ) project dedicated to inertial confinement fusion: development and construction status[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2005, **74**(1-4): 147-154.
- [5] ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, *et al.* Characteristics of beam alignment in a high power four-pass laser amplifier[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(8): 1591-1597.
- [6] WANG Fang, ZHU Qi-hua, JIANG Dong-bin, *et al.* Optimization of optical design of the master amplifier in multi-pass off-axis amplification system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5277-5282.  
王方,朱启华,蒋东宾,等.多程放大系统主放大级光学优化设计[J].物理学报,2006,**55**(10):5282-5282.
- [7] ZUO Yan-lei, ZENG Xiao-ming, HUANG Xiao-jun, *et al.* Pulse-front-distortion in large-aperture short-pulse laser

- systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8264-8270.
- 左言磊,曾小明,黄小军,等.大型短脉冲激光装置中脉冲前沿畸变效应的研究[J].物理学报,2009,**58**(12):8264-8270.
- [8] CELLIERS P M, ESTABROOK K G, WALLACE R J, *et al.* Spatial filter pinhole for high-energy pulsed lasers[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(12): 2371-2378.
- [9] SHARMA A K, PATIDAR R K, DAIYA D, *et al.* Simple and sensitive technique for alignment of the pinhole of a spatial filter of a high-energy, high-power laser system[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(12): 2546-2554.
- [10] POTEMKIN A K, BARMASHOVA T V, KIRSANOV A V, *et al.* Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(20): 4423-30.
- [11] GAO Yan-qi, ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, *et al.* Study of mathematical model for auto-alignment in four-pass amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6992-6997.  
高妍琦,朱宝强,刘代中,等.四程放大自动准直系统数学模型研究[J].物理学报,2008,**57**(11):6992-6997.
- [12] ZACHARIAS R A, BEER N R, BLISS E S, *et al.* Alignment and wavefront control systems of the National Ignition Facility[J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(12): 2873-2884.
- [13] GAO Yan-qi, ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, *et al.* Far field auto-alignment system used in SG-II-Up system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(6): 390-394.  
高妍琦,朱宝强,刘代中,等.神光II升级装置远场准直系统研究[J].物理学报,2011,**60**(6):390-394.
- [14] GAO Yan-qi, CUI Yong, LI Hong, *et al.* Alignment system for SGII-Up laser facility [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, **100**: 87-96.
- [15] HUNT J T, GLAZE J A, SIMMONS WW, *et al.* Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(13): 2053-7.
- [16] GAO Yan-qi, ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, *et al.* Propagation of flat-topped multi-Gaussian beams through a double-lens system with apertures.[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12753-12766.
- [17] GARANIN S G, EPATKO I V, L'VOV L V, *et al.* Self-focusing suppression in a system of two nonlinear media and a spatial filter[J]. *Quantum Electronics*, 2007, **37**(12): 1159-1165.
- [18] LU Feng-nian, LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, *et al.* Performance of image processing in beams automatic alignment system[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 335-337.
- [19] LIU Dai-zhong. Evolution of beam automatic alignment system in laser-fusion facility[J]. *Laser & Optonics Progress*, 2004, **41**(2): 1-5.
- [20] POTEMKIN A K, BARMASHOVA T V, KIRSANOV A V, *et al.* Spatial filters for high-peak-power multistage laser amplifiers[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(20): 4423-4430.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61605190, 11604317)

引用格式:YAN Shi-sen, LIU Dai-zhong, OU-YANG Xiao-ping, *et al.* Spatial Filter Pinhole Alignment on High Power Laser Facility[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(11): 1114002

闫世森,刘代中,欧阳小平,等.高功率激光装置空间滤波器小孔准直[J].光子学报,2018,**47**(11):1114002