

神光 III 强激光光束远场诊断系统光学设计*

沈为民¹ 吴泉英^{1,2} 薛鸣球¹

(1 苏州大学现代光学技术研究所, 苏州 215006)

(2 苏州科技学院实验中心, 苏州 215009)

摘 要 介绍了神光 III 光束远场诊断系统的基本组成, 光学系统的工作原理, 主要论述了光学系统的设计指标、设计思想、设计结果及其像质评价. 研究表明: 利用离轴非球面反射镜能很好地实现强激光光束的取样、缩束和衰减. 通过切换弯月形离轴非球面透镜可分别实现对基频、三倍频激光光束的远场诊断.

关键词 强激光束; 远场诊断; 离轴非球面; 光学设计

中图分类号 TN247; O435 **文献标识码** A

0 引言

神光 III 原型装置, 是以强激光作为驱动源来实现热核聚变的装置^[1]. 在强激光 ICF 打靶应用中, 焦斑质量(即激光远场分布)直接影响打靶效果, 是评价激光束质量的重要指标^[2,3]. 光束诊断系统是用于诊断原型装置多种波长激光束的性能, 如输出能量大小、能量一致性、光束发散角、光束能量均匀性、打靶焦斑弹着点偏差等性能参数的系统. 光束远场诊断系统^[3,4]的光学设计是整个系统的关键之一, 将直接影响远场诊断系统能否完成对原型装置强激光的诊断.

本文首先简要介绍神光 III 原型装置光束远场诊断系统的工作原理及技术要求, 然后, 着重给出真空取样组件和远场焦斑成像诊断组件系统的光学设计思想、设计结果、及像质评价.

1 光束远场诊断系统工作原理

图 1 为神光 III 原型装置激光束真空取样和诊断原理光路图, 靶面是前聚透镜将激光聚焦形成的焦面, 光束远场诊断系统将聚焦在靶面的激光光束由真空取样组件取样后, 分别送入焦斑成像诊断组件、时空特性组件、脉冲能量诊断组件进行性能诊断.

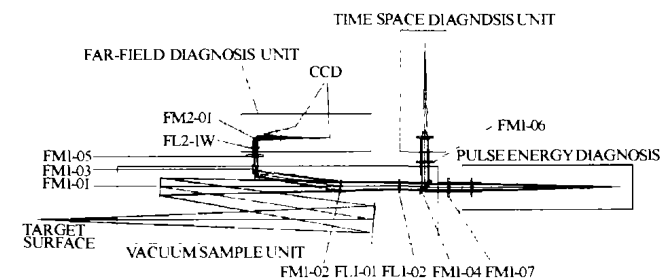


图 1 光路总图
Fig. 1 The whole optic system

光束远场诊断系统设计波长为基频 1.053 μm 、两倍频 0.527 μm 、三倍频 0.351 μm , 真空取样组件要求能出射远场焦斑诊断光束、时空特性诊断光束、脉冲能量诊断光束. 远场焦斑诊断组件要求二次放大率 $5\times$, 无畸变, 成像质量达到衍射极限.

如图 1, 真空组件中沿轴向分离的基频、倍频、三倍频靶面发出的光束, 经凹面取样反射镜 FL1-01 和平面取样反射镜 FM1-01 后以小角度入射到分束镜 FM1-02, 经分束镜 FM1-02 的光束分成两部分, 一部分反射的光束, 再经 FM1-03 反射, 透过窗口 FM1-05 后, 进入远场诊断组件. 另一部分透过的光束, 经消色差透镜 FL1-02 准直后, 入射至 45° 分束镜 FM1-04, 经 FM1-04 分成两束光, 分别经窗口 FM1-06 和 FM1-07, 入射至时空特性诊断组件和脉冲能量诊断组件中.

真空诊断组件的作用是把聚焦后的激光光束经过取样、缩束、衰减送入各个不同的诊断包, 从而完成激光光束远场诊断系统的多种波长的激光光束的性能诊断. 在真空诊断组件中, 离轴非球面反射镜 FL1-01 对光束进行成像取样和第一次衰减, 光束经过取样镜 FM1-01 进行第二次取样和衰减. 主光束再通过 FM1-02 进行取样, 由 FM1-03 反射后经过窗口 FM1-05 进入焦斑诊断模块, 完成焦斑特性诊断. 真空诊断组件中关键之一是凹面离轴非球面反射镜 FL1-01 的设计.

远场焦斑诊断光束以会聚光束经 FM1-02 和 FM1-03 反射、透过窗口 FM1-05 后, 进入远场诊断组件, 光束直接入射至 45° 平面取样反射镜 FM2-01 和小入射角平板分束器 FM2-02(如图 1), 反射部分用于诊断远场主瓣, 透射部分用于诊断远场侧瓣, 在放大成像透镜前后, 形成第一和第二像面.

2 远场诊断系统光学设计思想

真空组件中的凹面取样反射镜的主要作用是衰

*神光 III 工程项目资助

Tel: 0512-65113429 Email: swm@suda.edu.cn

收稿日期: 2004-05-12

减和放大成像,完成对三种波长激光的取样,在其前表面不镀膜,表面反射率为 4%,使光强衰减 25 倍,达到衰减强激光的作用,而且在凹面取样反射镜背面设置光束陷井吸收透过的强激光,避免在真空组件中引起杂光.

椭球面几何学上的焦点有重要的光学性质^[5,6],如图 2,椭球的几何焦点在 x 轴上,离坐标原

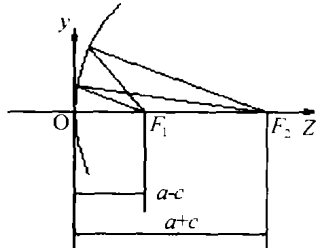


图 2 椭球面成像特性

点 O 的距离为 $a \pm c$, c 与长短轴系数 a, b 的关系为 $c^2 = a^2 - b^2$,可得到式(1)

$$a - c = R/(1 + e), a + c = R/(1 - e) \quad (1)$$

式中 R 为曲面顶点的曲率半径, e 是曲面的偏心率,即曲面的形状系数 ($0 < e^2 < 1$),轴上 F_1 和 F_2 两位置即为椭球面的几何焦点,当椭球面为反射面时,由椭球面某一焦点 F_1 发出的光束经椭球面反射后,必将通过另一共轭焦点 F_2 ,由于椭球面有此无像差共轭成像的特征,在设计真空组件的反射镜时,采用凹面椭球反射镜,有效地消除了像差,保证焦斑取样的真实性. 根据设计要求,真空诊断组件的作用是对靶点的焦斑光束通过凹面椭球反射镜取样后,送入各个诊断包中,而光束经凹面椭球反射镜反射后,物像在同一侧,要使物像能分离从而实现真空取样组件的功能,凹面椭球反射镜须采用离轴方式工作.

光束远场诊断系统要对基频、两倍频、三倍频三种波长的光束进行诊断. 如图 3,通过靶点前透镜聚焦后,由于色差的原因,光斑实际会聚的位置不一致,不同波长的光束聚焦点(靶点位置)随波长变化,而在焦斑远场诊断组件中(如图 1),对应不同倍频的激光光束,要求 CCD 光敏面的位置不变,因此在光学系统设计时,要设法使不同波长的光束经系统成像后,在焦斑诊断组件中第一像面位置重合,并放大成像在相同的第二像面(即 CCD 光敏)处. 为此以三倍频(波长 $0.351 \mu\text{m}$) 光束为基准,将会聚光

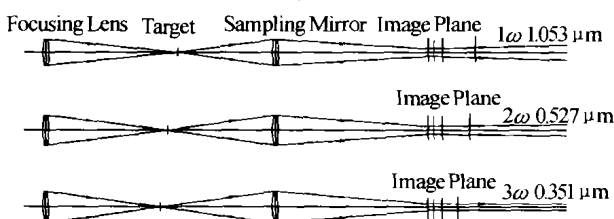


图 3 三种波长的光在系统中的原理示意图
Fig. 3 Principle diagram of three different wavelength beams

成像在第一像面,设计放大成像透镜,对焦斑放大后进行测量,考虑到 CCD 系统的分辨能力,采用空间分辨率为 $10 \mu\text{m}$ 的 CCD.

设计选择性反射镜 FM1-03,反射三倍频时,远场诊断组件用于诊断三倍频光束的远场特性,当选择性反射镜切换为反射基频的 FM1-03'时,远场诊断组件用于诊断基频光束的远场特性,这时需在窗口后面插入弯月形透镜,用来校正基频光束像差,使基频与三倍频的第一像面重合,并仍然用三倍频放大透镜,分别得到基频主瓣和侧瓣放大靶像. 切换至基频时插入弯月形透镜,为能消除真空组件中离轴椭球凹面反射镜引起的像差,弯月形透镜也采用非球面并离轴使用. 因基频激光波长比三倍频波长较长,光路中采用非球面时对非球面公差要求低,可以降低非球面制造精度,因此,在设计时考虑以三倍频光束为基准,弯月形离轴非球面透镜使用于基频.

3 远场诊断系统光学设计结果和像质评价

3.1 设计结果

真空组件中的凹面取样反射镜采用离轴椭球面,凹面成像离轴角为 8° . 远场焦斑诊断组件设计结果如图 4,从真空组件中出射的会聚光束,经窗口

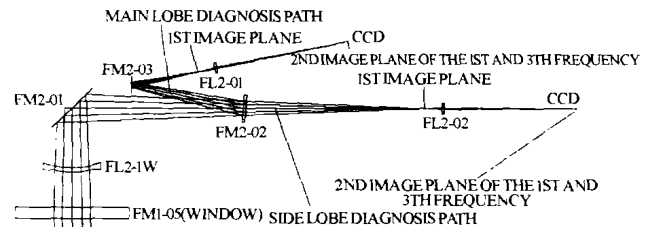


图 4 远场焦斑诊断组件

Fig. 4 Far-field focus diagnosis parts

FM1-05 入射至反射镜 FM2-01,由 FM2-01 反射的光束入射到平板分束器 FM2-02,反射光用于诊断远场主瓣,透射光用于诊断远场侧瓣,在主瓣诊断光路和侧瓣诊断光路中所成的第一像面,分别经放大透镜 FL2-01 和 FL2-02 放大成像在 CCD 光敏面上进行焦斑诊断. 弯月形透镜 FL2-1W 在切换至诊断基频激光光束时插入,透镜 FL2-1W 为非球面透镜,非球面方程见式(2).

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, c = \frac{1}{151.36 \pm 0.2}, k = 0.500 \pm 0.001 \quad (2)$$

此非球面的 k 系数大于 0,为扁椭球面. 该椭球面离轴使用,很好地消除由真空组件中凹面椭球反射镜产生的离轴非球面像差.

放大透镜 FL2-01 和 FL2-02 分别置于距焦斑(第一像面) 30 mm 处,放大透镜焦距为 25 mm ,由

成像关系在距透镜后 150 mm 处得到放大 5 倍的像 (三倍频) 供 CCD 接收。

3.2 远场焦斑诊断组件质量评价

3.2.1 像质评价

远场焦斑诊断组件的成像质量如表 1 所示, 三

倍频第一像面经透镜 FL2-01 和 FL2-02 成像的放大倍率为 5 倍, 基频第一像面主瓣和侧瓣的放大倍率分别为 7.39 和 7.29, 畸变均小于万分之二。点列图的直径远小于 Airy 斑的直径如图 5、图 6、图 7、图 8, 因此, 成像性能达到衍射极限, 满足设计技术要求。

表 1 远场焦斑诊断组件的成像特性

诊断光路	主瓣				侧瓣			
	基频		三倍频		基频		三倍频	
波长分量	基频		三倍频		基频		三倍频	
像面倍率	7.39		5.00		7.29		5.00	
畸变%	2.1E-3	6.4E-3	2.0E-6	1.6E-2	2.1E-3	5.6E-3	2.0E-6	1.7E-2

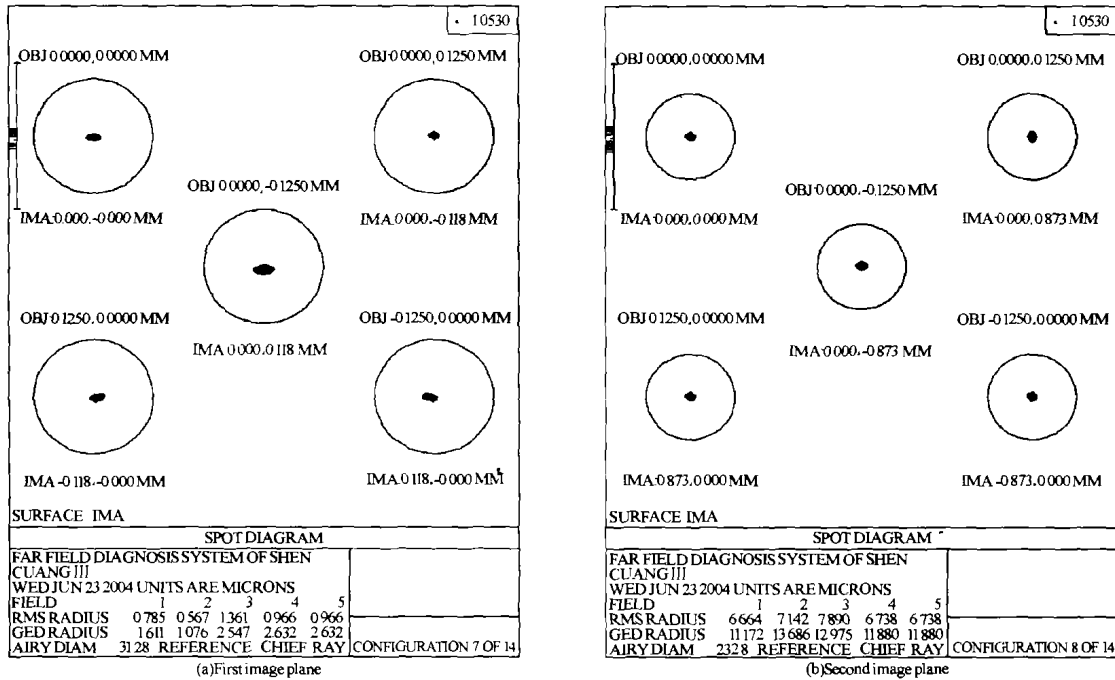


图 5 主瓣基频像面上的点列图

Fig. 5 Spot diagram of main segment fundamental frequency

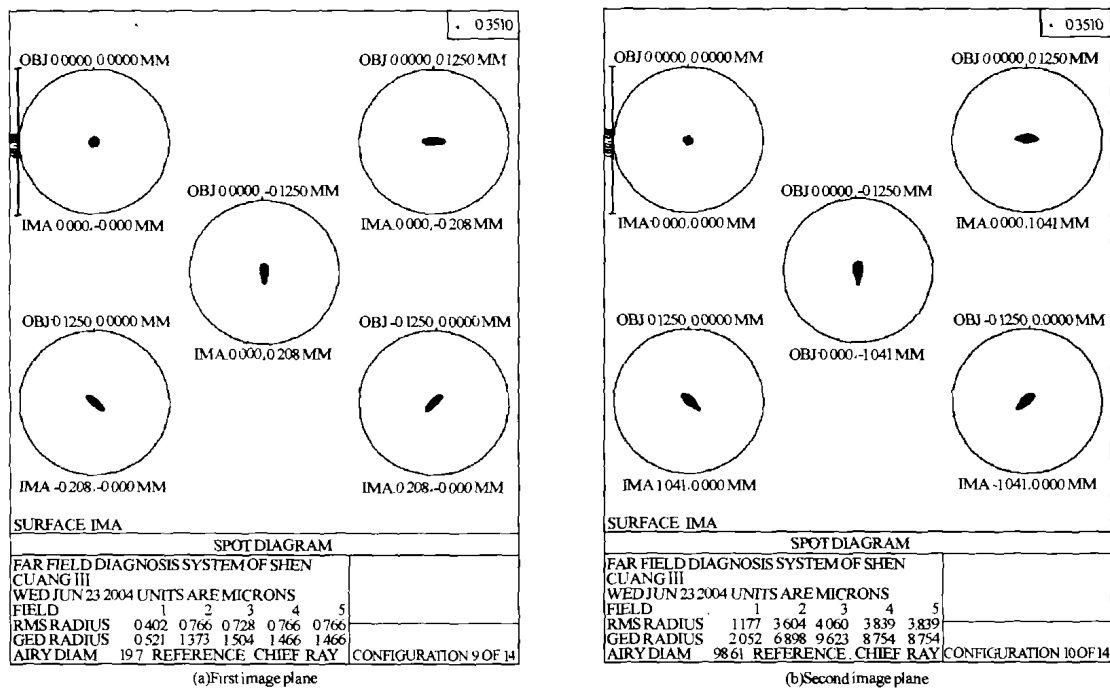


图 6 主瓣三倍频像面上的点列图

Fig. 6 Spot diagram of main segment three-order frequency

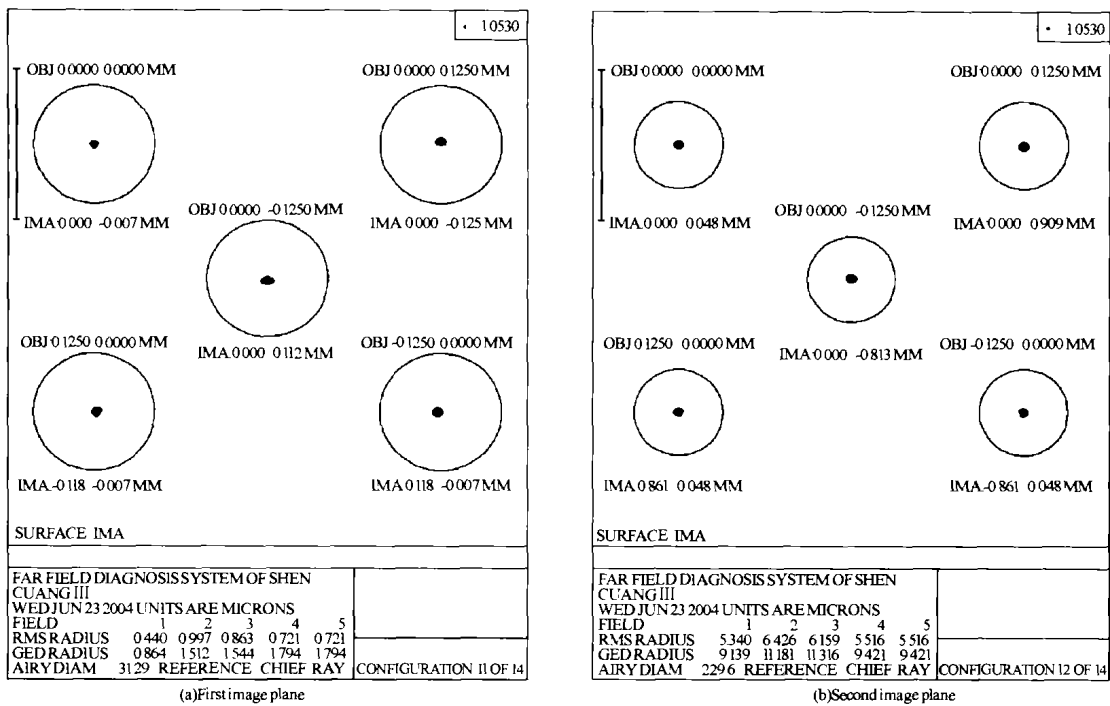


图 7 侧瓣基频像面上的点列图

Fig. 7 Spot diagram of side segment fundamental frequency

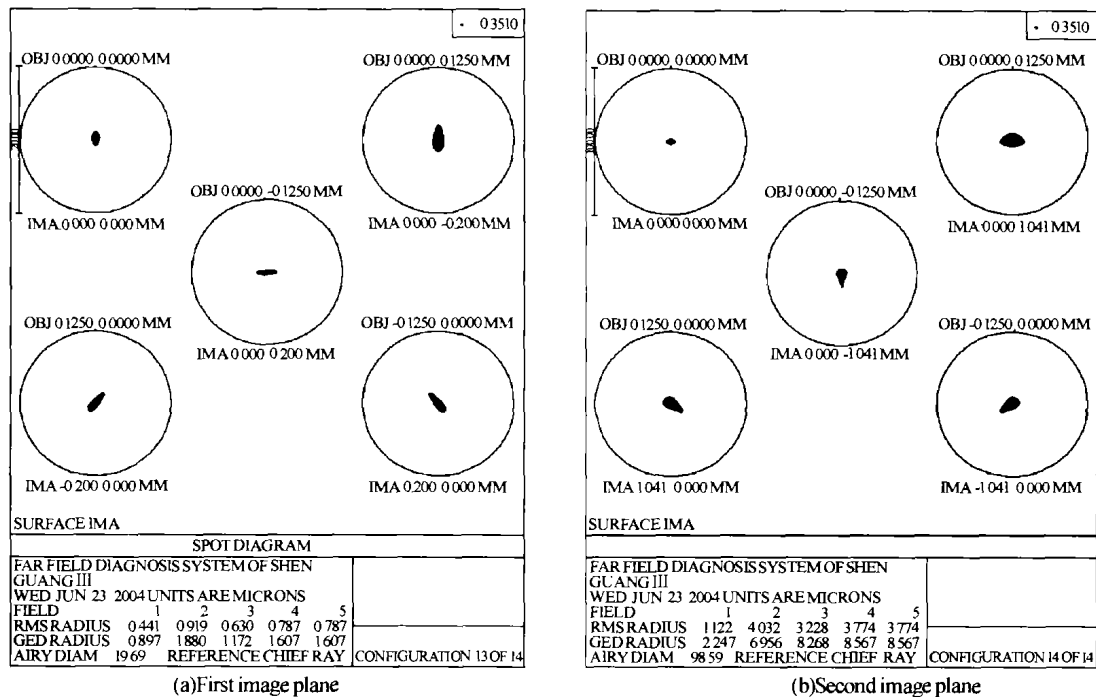


图 8 侧瓣三倍频像面上的点列图

Fig. 8 Spot diagram of side segment three-order frequency

3.2.2 焦斑漂移对像质的影响

由于激光器的不稳定,激光经前置会聚透镜聚焦后,会使焦斑轴向和横向产生漂移,焦斑漂移会对远场诊断组件的像质产生影响.

焦斑轴向漂移将使像面离焦,仅当漂移小于约 ± 0.13 mm 时,波像差 RMS 值接近衍射极限,成像质量仍是衍射受限的.

图 9 给出了漂移为 0.13 mm 时的点列图和波像差曲线. 图中的圆表示衍射极限. 图 10 是焦斑漂移 1 mm 时在第一像面 (a) 和第二像面 (b) 处得到

的点列图,其直径远大于图中圆所示的衍射极限.

焦斑轴向漂移引起的像质变坏,除非以主动方式改变像面或某个光学元件位置,否则,很难消除此影响. 为保持衍射受限像质,建议尽可能减小焦斑的轴向漂移,使之不超过 ± 0.15 mm.

焦斑横向漂移会使视场偏离设计有效视场. 图 11 是横向漂移分别为 -2、-1、0、1、2 mm 时,三倍频第一像面处的点列图. 在第二像面处可有类似的情况. 另外,激光器横向漂移过大时,会使第二像面偏离 CCD 探测器光敏面.

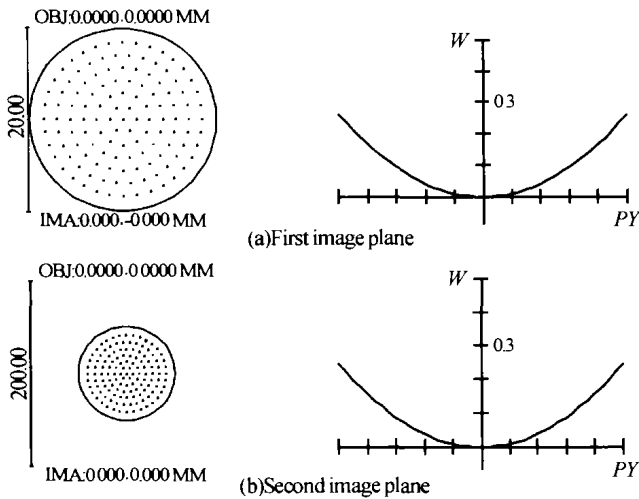


图9 焦斑漂移 0.13 mm 时,三倍频点列图与波像差曲线
 Fig.9 Spot diagram and wave aberration curve of three-order frequency as focus shifts 0.13 mm

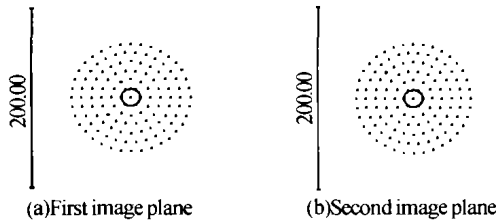


图10 焦斑漂移 1 mm 时,三倍频的点列图
 Fig.10 Spot diagram of three-order frequency as focus shifts 1 mm

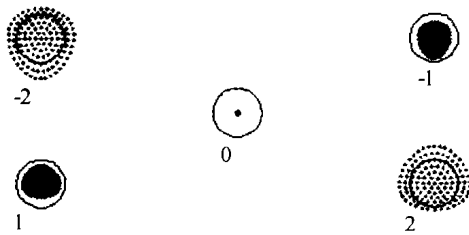


图11 横向漂移对点列图的影响
 Fig.11 Influence of lateral shift on spot diagram

焦斑的实际漂移是空间三维随机的,轴向和横向漂移同时出现,因此,焦斑的实际漂移在轴向和横向都要处于允许的范围,系统才能保持像质在衍射极限内。

4 结论

以上介绍了神光III强激光光束远场诊断系统的

基本组成和工作原理,阐述了光学系统的设计思想和设计结果,通过像质评价论证了系统的光学设计满足设计要求. 真空组件实现了激光光束取样、衰减和缩束等功能,焦斑远场诊断系统完成了对不同波长激光焦斑的诊断,成像像斑达到衍射极限的要求.

参考文献

- 1 彭翰生,张小民,范滇元,等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题. 中国工程科学,2001,3(3):1~8
 Peng H S, Zhang X M, Fan D Y, et al. *Engineering Science*, 2001,3(3):1~8
- 2 Leeper R J,等. “激光点火装置”的靶诊断系统. 强激光技术进展,1999,(1):1~14
 Leeper R J, et al. *Progress of High Power Laser Technology*, 1999,(1):1~14
- 3 谢旭东,陈波,何凌,等. 强激光远场焦斑重构算法研究. 强激光与粒子束,2003,15(3):237~240
 Xie X D, Chen B, He L, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003,15(3):237~240
- 4 夏志坚,叶金祥. 激光焦斑分析系统. 重庆大学学报(自然科学版),1992,15(1):94~99
 Xia Z J, Ye J X. *Journal of Chongqing University: Science*, 1992,15(1):94~99
- 5 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验. 北京:科学出版社,1994. 1~8
 Pan J H. *Design, Manufacture, and Test of Optical Aspheric Surfaces*. Beijing: Science Press,1994. 1~8
- 6 Fischer R E, Gale B T. *Optical System Design*. New York, USA. McGraw-Hill Companies, Inc. 2000. 115~127
- 7 樊学武,陈荣利,马臻,等. 偏心和倾斜光学系统初级象差理论的研究. 光子学报,2004,33(4):494~496
 Fan X W, Chen R L, Ma Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(4):494~496
- 8 胡炳梁,马文彩,孙益善,等. CCD自动调光设计. 光子学报,2002,31(4):504~506
 Hu B L, Ma C W, Sun Y S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(4):504~506

Optical Design of Far Field Beam Diagnosis System in Shen-Guang Ⅲ Intense Laser

Shen Weimin¹, Wu Quanying^{1,2}, Xue Mingqiu¹

1 *Modern Institute of Optical Technology of Soochow University, Suzhou 215006*

2 *Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009*

Received date: 2004-05-12

Abstract The fundamental construction and the principle of far-field beam diagnosis system in Shen-Guang Ⅲ intense laser are introduced. The performance index, design ideas, and evaluation of the optical system are expounded. The laser beam sampling and attenuation is completed with an off-axis ellipsoidal mirror. The far-field diagnoses of its fundamental and three-order frequency parts are implemented by means of an off-axis aspheric lens.

Keywords Intense laser beam; Far-field diagnosis; Off-axis aspheric surface; Optical design



Shen Weimin works in Institute of Modern Optical Technology of Suzhou University. He has issued over twenty papers. He received his B. Sc (physics) and M. S. (optics) degrees from Suzhou University, China, in 1984 and 1995 respectively. Now he is a Ph. D. student of the Chinese Academy of Sciences in applied optics.