

# 高功率激光系统空间滤波器透镜焦距的选择及其测量

徐世祥 管富义 林尊琪 范滇元

(中国科学院上海光机所高功率激光联合实验室, 上海 201800)

**摘要** 对高功率激光系统中空间滤波器中透镜  $f/D$  选择所涉及的几个问题进行了探讨, 并设计了一种适合于大  $f$  数透镜焦距测量的方法。

**关键词** 高功率激光, 空间滤波器,  $f$  数, 透镜焦距测量

## 1 引言

在高功率激光系统中, 空间滤波器是其中关键的技术单元之一。它不但能大大减少光在系统中传输的有效距离(中继成像作用), 从而大大抑制了光的衍射效应, 而且能有效地去除光在传输过程中由于衍射或非线形效应产生的高频调制(空间滤波作用)。因此它能有效地改善系统的光束质量。在有效地提高了系统光学元件能量负载的同时, 也大大提高了系统的可输出功率和可聚焦功率。它的工作原理已为人们所熟知, 它的光学结构也非常简单, 即一对共焦透镜和在公共焦点处加一滤波小孔(如图 1)。这些方面, 在此不想赘述。本文只想从它的作用及其工作环境出发, 讨论其透镜焦距的选择问题, 并设计出一种适合于大  $f$  数透镜焦距测量的方法。

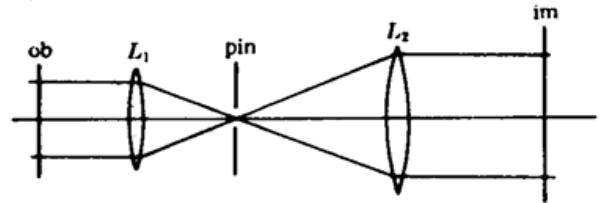


Fig. 1 The sketch of a spatial filter  
ob: object plan;  $L_1$ : input lens;  $P_{in}$ : pinhole;  
 $L_2$ : output lens; im: image plan

## 2 空间滤波器中透镜焦距的选择

在高功率激光系统中, 空间滤波器光学系统的设计要求为: (1) 根据空间滤波器前、后方放大器的口径决定它的入、出射透镜口径; (2) 综合考虑入射光强大小、真空度要求、空间频率分量的选取和静态像差等因素设计透镜的焦距和形状。从图 1 知空间滤波器两透镜的口径比等于它们的焦距比, 换言之, 两透镜的  $f$  数是相同的。一旦入射透镜的焦距选定, 它们的  $f$  数也就决定了, 可见入射透镜焦距  $f$  的选择在滤波器的设计中是比较重要的。

$f$  大小直接影响滤波器的机械和真空器件配套。我们知道, 在入射光束的发散角一定的条

件下,入射透镜像方焦面上光斑大小与透镜的焦距成正比,此光斑即为滤波小孔处光斑。这有两条意义:(1)此处光斑的功率密度与光斑尺寸的平方成正比。为避免在小孔处产生空气击穿,当焦斑功率达到一定程度时,滤波器就有一定的真空度要求<sup>[1]</sup>,于是就须配以相应的机械结构和真空设备。为减少系统的真空度要求,简化其结构,应尽量增大  $f$  值。当然,从另一方面来讲, $f$  变大,滤波器的尺寸也变大,这也使器件本身变得庞大。(2)我们知道空间滤波器是用来滤去空间高频分量的。由空间频率的概念可知, $f$  越大,则频谱面上的空间频率间隔越大,此时在相同截止频率的条件下所需小孔尺寸也越大。这不但有利于对空间频率分量的选取,而且降低了对小孔加工精度的要求。在实际设计中,往往用衍射极限倍数的大小来度量小孔的大小。对于口径为  $D$ (在此近似地等于通光口径),焦距为  $f$  的透镜,则滤波小孔处相邻两级衍射极限的距离近似为:

$$\Delta d = \lambda f / D \quad (1)$$

可见,增大  $f$  有利于更精确地选取空间频率分量。一般来说,几毫米量级的小孔机械加工精度为 0.01 mm 量级,故设计时,应使  $\lambda f / D > 0.01$  mm,此时,  $f / D > 10$ ; 最好应使  $f / D > 20$ 。

当然也不是说  $f$  越大越好。 $f$  增大除了引起滤波器尺寸庞大外,在有一定的像差要求情况下,还会引起对透镜光学加工要求更加严格。例如对于一口径为  $D$ 、曲率半径为  $r$  的光学面,当加工面上光圈数要求为  $N$ ,光圈扭曲量要求为  $\Delta N$  时,则表面变形量(曲率半径之差)  $\Delta r$  为<sup>[2]</sup>:

$$\Delta r = \frac{4r^2}{D^2} N \lambda \quad (2)$$

表面曲率半径的不一致性(像散)为:

$$\Delta \alpha = \frac{4r^2 \lambda}{D^2} \Delta N \quad (3)$$

假定透镜的两个加工面的  $\Delta r$ ,  $\Delta \alpha$  的正负以及  $\Delta \alpha$  发生的位置具有随机性,并认为这两个表面均对光轴上像点的像散形成起相同作用。在薄透镜的近似下有:

$$\Delta f = \sqrt{2} (n - 1) \frac{4f^2 \lambda}{D^2} N \quad (4)$$

$$\Delta A = 4 \sqrt{2} (n - 1) \frac{f^2 \lambda}{D^2} \Delta N \quad (5)$$

其中  $\Delta f$  为焦距误差,  $\Delta A$  为透镜两个面引起的总像散。从(4)、(5)两式可知,  $f / D$  越大,在同样的  $N$ ,  $\Delta N$  条件下,  $\Delta f$ ,  $\Delta A$  越大。这意味着在一定的  $\Delta f$ ,  $\Delta A$  条件下光学加工要求更加严格。

综上所述,选择入射透镜焦距时主要应考虑以下三个方面:(1)  $f / D$  最好大于 20,这是为了滤波小孔能精确地选取空间频率分量;(2) 根据像差要求和光学加工技术条件确定  $f / D$  上限。例如  $\Delta A \leq 1$  mm,  $\Delta N = 0.2$  时,  $f / D \leq 43$ ;(3) 兼顾系统的真空度要求及其机械结构的配套。

当然,这三个方面应灵活掌握。在高功率激光系统中,主放大部分的前几级由于入射光强小,故物面上空间增长最快的频率也小,同时其入射光口径也小,此时往往  $f / D$  选得比较大。例如对于口径为 20 mm,入射光强为  $10^7$  W/cm<sup>2</sup>,空间增长最快的频率为  $4.5$  cm<sup>-1</sup>。此时如果  $f = 400$  mm,即  $f / D = 20$ ,则要滤去此频率分量,滤波小孔直径应小于 0.06 mm。这样的小孔太小,小孔的加工误差对滤波效果影响较大,不利于空间频率的精确选取。设计时  $f / D$  往往取 80 甚至 100 之多,而用较小的  $\Delta N$  ( $\Delta N = 0.1$ ) 来控制  $\Delta A$ 。在中、后级,入射光强较大,  $f / D > 20$  即可,此时  $\Delta A$  的控制和滤波小孔处真空度的要求及其相应的机械结构配套应偏重考虑。

### 3 高 $f$ 数光学透镜的焦距测量

由前面的讨论可知,对于大  $f$  数的透镜,同样的  $N$  数加工要求,可能引起较大的焦距误差。例如当  $N = 3$ ,  $f/D = 30$ ,  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  时,  $\Delta f$  达 6 mm 之多。诚然,  $f/D$  变大,透镜焦深越大。但在旁轴近似下,焦深可表示成:

$$\Delta = \frac{4f^2}{D^2} \lambda \quad (6)$$

由(4)、(6)式可得:

$$\frac{\Delta f}{\Delta} = \sqrt{2(n-1)N} \quad (7)$$

可见当  $N > 1$  时,可能产生的焦距加工误差  $\Delta f$  总是大于  $\Delta$ 。对于大口径透镜(高功率激光系统中的透镜口径大到上百毫米),  $N < 2$  的加工要求是相当高的。一般情况下  $N$  取 3 左右,这就给空间滤波器的轴向调节机械结构增加了负担。如果对光学加工后的透镜焦距进行测量,并用实测值作为滤波器机械结构的设计参数,利用透镜固有的焦深,就可完全取消滤波器的轴向位移调节装置,这不仅简化了结构,减少了费用,同时也简化了装置调整步骤。

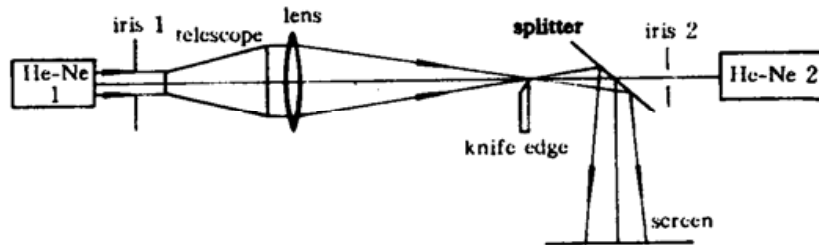


Fig. 2 The setup for measuring the length of high  $f/D$  lenses

测量透镜的方法很多,有放大率法、自准直法、附加透镜法等等<sup>[3]</sup>。完全照搬这些方法在这种场合都不很适合。这是因为所测量的透镜  $f$  都较大(几米至十几米)时,光以一小角度入射透镜就会引起较大的测量误差,所以测量时应保证光正入射透镜。要做到这点可不容易,其原因为(1)为提高测量精度,应尽量使入射光束充满透镜,为此一般在光源和待测透镜间采用高倍扩束望远镜;(2)测量的波长原则上应是透镜的工作波长(高功率激光系统所用的基频激光波长一般为  $1.053 \sim 1.06 \mu\text{m}$ )。但从测量的效率出发,所用的光源应是连续或重复频率可见光源。这种光源经高倍扩束后(往往扩至  $20 \sim 100 \text{ mm}$ ),待测透镜的表面反射像都很弱。从简易、实用并保证足够的测量精度出发,本文设计了一种适合于测量大  $f/D$  值透镜焦距的双光源、刀口法测量装置(如图 2 所示)。图中采用光束质量较好的 He-Ne 激光器(激光波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ )作为测量光源。将测量的结果加上测量波长与工作波长的色差值即得工作波长下的焦距。此装置的特点是:两个光源精确同轴,所以可利用 He-Ne 光源来调整透镜使入射光正入射透镜;利用精度较高的刀口法寻找焦点位置(原则上可精确到透镜球差范围)。在实际测量中,当待测透镜光学加工  $N$  数为 2,  $f/D$  为 80.09,计算焦距为 3804.7 mm,焦深为 27.78 mm,光学加工可能引起的偏差为  $\pm 39.8 \text{ mm}$ (大于焦深),测量值为 3790 mm。在焦点附近,当刀口离开焦点约 3 mm 时,刀口剪切光斑时观察屏上光斑亮度变化图案才明显不同于焦点处刀口剪切光斑时的情形,说明测量精度不会低于 3 mm(这个值明显大于其球差是由于人眼灵敏度限制及透镜焦深的影响)。对于这样的透镜,这样的测量精度是比较好的。

## 参 考 文 献

- 1 王桂英, 赵九源, 张明科 等. 物理学报, 1985, 34(2): 171~181
- 2 米. 德. 马尔采夫 著, 张曾杨, 王善政, 孟丁武 等译. 光学元件的公差计算. 北京: 国防工业出版社, 1980. 79~102
- 3 苏大图著, 光学测量. 北京: 机械工业出版社, 1986. 53~59

## Design and Measurement of Focal Lengths of Lenses of Large $f$ -number Used in Spatial Filters in a High Power Solid-state Laser System

Xu Shixiang Guan Fuyi Lin Zunqi Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Some problems, which are concerned with the focal lengths of lenses used in spatial filters in a high power solid-state laser system, are investigated. And, a method suitable for measuring the focal lengths of lenses, the  $f$ - numbers of which are larger than these of the usual ones, is also introduced.

**Key words** high power laser, spatial filter,  $f$ - number, measurement of lenses' focal lengths