

文章编号: 1001-3806(2005)03-0334-03

高功率激光装置中透镜一阶鬼点形成规律分析

王 方, 朱启华, 张清泉, 景 峰, 彭志涛, 胡东霞

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了得到一阶鬼点形成的一般规律, 从成像公式出发, 利用薄透镜近似, 对在高功率激光装置中所使用的各种形状的透镜, 各表面剩余反射形成的一阶鬼点位置与其焦距的关系进行了推导, 给出了两种入射方式下的关系式, 为高功率激光装置中透镜的设计提供了一定的参考。

关键词: 鬼点; 高功率激光装置; 成像公式; 薄透镜近似

中图分类号: TN 248.1 文献标识码: A

The relations between the first-order ghost image and the focal length in the high power laser facility

WANG Fang, ZHU Qi-hua, ZHANG Qing-quan, JING Feng, PENG Zhi-tao, HU Dong-xia

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract Using the thin lens approximation and imaging formulation, the relations between the first-order ghost image and the focal length of all kinds of lenses are derived, which provides guidance for the design of lens in the high power laser facility.

Key words ghost image; high power laser facility; imaging formulation; thin lens approximation

引 言

高功率固体激光装置的透射元件的表面虽然镀有减反膜, 但这些膜层并不是完美无缺的, 每一表面都反射一小部分入射光, 这些微弱的剩余反射光称为“鬼”光束。即使每个表面的反射率小于 0.1%, 对单束能量达千焦量级的惯性约束聚变驱动器来说, 一阶鬼点仍可达到焦耳量级, 极易对元器件造成损害^[1, 2]。因此, 对一阶鬼点的位置作定量分析对高功率激光系统设计是非常必要的。由于在 ICF 激光驱动器中使用空间滤波器来滤波, 这就在系统中引入了透镜, 使得在进行激光系统的设计时空间滤波器透镜的光学设计就显得极为重要, 在考虑减小像差的同时必须考虑鬼点, 特别是一阶鬼点的分布问题。马再如等^[3]利用矩阵光学的方法, 推导出了等曲率半径的透镜产生的低阶鬼点的位置公式, 但在高功率激光装置中出于加工成本、减小像差和控制鬼点等的目的, 主要使用正透镜, 除马再如等^[3]所推导的等曲率半径双凸透镜外, 还包括平凸透镜、最小球差双凸透镜及弯月透镜, 而大口径透镜基本上不使用等曲率半径的双凸透镜, 因此, 需要对不

同形状的透镜进行分别计算。在进行鬼点位置的光路计算中, 可以把鬼点看作是光路中的某个焦点在经过多次成像后的像, 因而有很多方法, 本文中采用像传递的算法对一阶鬼点位置进行计算, 并利用光学追迹软件 ZEMAX 对计算结果进行比对验证。

1 方法及计算

由于在激光装置中, 透镜基本上都是共焦使用, 而在光束经过透镜时无非是两种情况: (1) 平行光入射; (2) 从透镜的前焦点发出的光入射。对于单透镜形成的一阶鬼点有如图 1 所示两种成像方式。

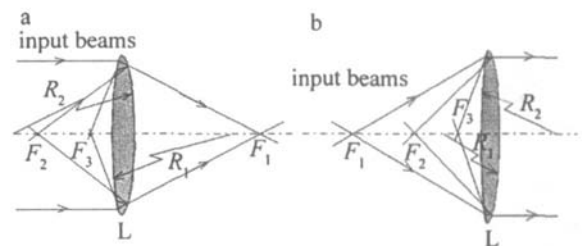


Fig 1 Two modes of input beams

当光束平行入射时, 如图 1a 所示, 透镜 L 对无穷远处的物成像为 F_1 , 利用薄透镜焦距公式和薄透镜成像公式:

$$f' = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} \quad (1)$$

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (2)$$

基金项目: 国家高技术八六三计划资助项目 (45090)

作者简介: 王 方 (1979), 男, 研究实习员, 主要从事高功率固体激光技术研究。

Email: mengli_wang@263.net

收稿日期: 2004-03-16 收到修改稿日期: 2004-06-29

式中, f' 为薄透镜焦距, r_1, r_2 为薄透镜两面的曲率半径, l' 为物距, l 为像距, n 为透镜折射率, 可以确定 F_1 的位置; 其中反射曲面 R_2 对 F_1 成像为 F_2 , 利用反射球面焦距公式和反射球面成像公式:

$$f' = \frac{r}{2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{2}{r} \quad (4)$$

式中, f' 为反射球面焦距, r 为反射球面曲率半径, l' 为物距, l 为像距, 可以确定 F_2 的位置; 透镜 L 对 F_2 成像为 F_3 , 利用 (1) 式确定 F_3 的位置, F_3 即为透镜 L 后表面的一阶鬼点。

当光束从透镜的前焦点入射时, 如图 1b 所示, 透镜对前焦点 F_1 成像为无穷远处, 反射曲面 R_1 对无穷远处的物成像在曲面的焦点为 F_2 , 透镜 L 对 F_2 成像

为 F_3 , 用类似第 1 种情况的方法可以确定 F_1, F_2 和 F_3 的位置, F_3 即为透镜 L 后表面的一阶鬼点。

大型激光装置中主要使用的 4 种正透镜: (1) 等曲率半径双凸透镜, $R_1 = R_2$; (2) 最小球差双凸透镜, 其两面曲率半径满足^[4]:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n+1)} f' \\ R_2 = \frac{n(2n+1)}{2n^2-n-4} \end{cases} \quad (5)$$

式中, f' 为薄透镜焦距, n 为透镜折射率, R_1, R_2 为透镜前后面的曲率半径; (3) 平凸透镜 $R_1 = \infty$; (4) 弯月透镜。将透镜看作是薄透镜, 可以推出透镜反射的一阶鬼点到原点的距离与透镜焦距的比值 l/f' 只与透镜在给定波长下的折射率 n 有关, 表 1 中给出了具体的关系。

Table 1 The relations between l/f' and index n

incidence mode	lens types				
	$R_1 = \infty$	$R_1 > 0$	$R_1 = -R_2 < 0$	lens with minimum spherical aberration	
	$R_2 < 0$	$R_2 = \infty$		incidence in sequence	incidence contradictorily
parallel incidence	$\frac{n-1}{2n}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{n-1}{2n-1}$	$\frac{(n+2)(n-1)}{3n}$	$\frac{(n+2)(n-1)}{4n^2+2n-2}$
incidence of light from the focus	$\frac{n-1}{n+1}$	1	$\frac{n-1}{n}$	$\frac{(n+2)(n-1)}{2n+2-n^2}$	$\frac{(n+2)(n-1)}{2n^2+2n-2}$

根据表 1 的结果, 对于这 3 种透镜可以得出以下结论: (1) 透镜所用玻璃材料的折射率 n 一般在 1.5~1.7 之间, 而在此范围内, 表 1 所列各表达式的值均随 n 的增大而增大, 即透镜一阶鬼点位置与焦距的比值随折射率的增大而增大; (2) 当透镜的材料, 即折射率确定后, 其一阶鬼点位置与焦距的比值一定。这样便可通过控制透镜的焦距长短来控制一阶鬼点的位置。在高功率激光装置中, 可以采用适当加长透镜焦距的长度使一阶鬼点远离光学元件, 而在口径不变的情况下, 焦距的加长也有利于减小系统像差。

对于第 4 种透镜, 即弯月形透镜, 在大型激光装置中出于避鬼点的需要, 一般将凸面朝向平行光面, 而凹面朝向焦点。当由焦点发出的光入射到透镜的两个曲面上所形成的两个一阶鬼点都在焦点的这一边, 即会被空间滤波器小孔板所挡。因此, 主要考虑平行光入射到弯月透镜的凸面上所形成的一阶鬼点。设两个曲面的半径分别为 R_1, R_2 。由于透镜焦距 $f' > 0$, 根据 (3) 式, 有 $R_2 > R_1 > 0$ 。根据平行光入射的一阶鬼点成像规律及 (1) 式 ~ (4) 式, 可以得到透镜原点到反射的一阶鬼点的距离:

$$l = \left[\frac{1}{\frac{2n}{R_2} - \frac{2n-2}{R_1}} \right] \quad (6)$$

式中, n 为透镜折射率, l 为透镜原点到反射的一阶鬼

点的距离。由此关系式可以得到以下结论: (1) 当 $R_2 / R_1 > n / (n-1)$ 时, $l < 0$ 一阶鬼点在入射光一侧, 为实鬼点, 有害; (2) 当 $R_2 / R_1 < n / (n-1)$ 时, $l > 0$ 一阶鬼点在入射光的另一侧, 为虚鬼点, 无害。

2 误差分析和实验验证

由于在计算中采用了薄透镜近似, 上面的计算结果和实际所使用的厚透镜会有所出入, 而在高功率激光装置中所使用的透镜 $d \ll |r_1 - r_2|$, 从厚透镜焦距公式:

$$f' = \frac{nr_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + (n-1)d]} \quad (7)$$

可以看出, 厚透镜焦距和同样曲率半径的薄透镜焦距相差很小, 因此, 根据表 1 的式子所计算的透镜原点到一阶鬼点的距离与其焦距的比值误差不会很大。表 2 中利用商用光束追迹软件 ZEMAX 对厚度为 40mm, 焦距为 5000mm, 折射率约为 1.5 的正透镜, 对照表 1 中的各个结果进行了比较计算。从表 2 的对照结果来看, 由公式推导出来的结果与 ZEMAX 验算结果比较符合, 推导过程中所作的近似并未影响到所推出的一般关系式的通用性, 并验证了推导所得结果的正确性。

以上推导所得结果已经在单束输出能量达到千焦量级的多程放大系统^[5]的调试及运行过程中得到应用, 实验结果证明所得结果是正确的。

Table 2 Checking computations by means of the software ZEMAX

incidence mode	the compare of the result	lens types				
		$R_1 = \infty$ $R_2 < 0$	$R_1 > 0$ $R_2 = \infty$	$R_1 = -R_2 > 0$	lens with minimum spherical aberration	
					incidence in sequence	incidence contradictorily
parallel incidence	according to formula	0.1667	0.5	0.25	0.3889	0.1842
	checking computations	0.1648	0.4983	0.2472	0.3825	0.183
incidence of light from the focus	according to formula	0.2	1	0.3333	0.6364	0.2258
	checking computations	0.1994	1	0.3322	0.6360	0.2273

3 总 结

推导得到了除弯月透镜外其它所有形状的正透镜的一阶鬼点与其焦距的一般关系式,对弯月透镜也给出了能够避免鬼点损害的曲率半径范围,能够在透镜的焦距确定后比较容易地确定一阶鬼点的位置,为高功率激光装置中透镜的设计提供了一定的参考,减少了光学设计人员的工作量。

参 考 文 献

[1] HENDR K J L, SCHWEYEN J ROWE J *et al*. Ghost analysis visu ar

lization techniques for complex systems examples from the NIF final optics assembly [J]. Proc SPIE, 1998, 3492: 306.

[2] 谭吉春, 景 峰, 朱启华 *et al*. 多通放大器腔内的杂散光 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 159~163
 [3] 马再如, 刘文兵, 冯国英 *et al*. 高功率激光系统的低阶鬼点位置公式 [J]. 激光杂志, 2003, 24(2): 55~58.
 [4] 李晓彤. 几何光学和光学设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 9~17.
 [5] 朱启华, 张小民, 景 峰 *et al*. 多程放大系统总体光路的稳定性研究 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6): 635~656

(上接第 333页)

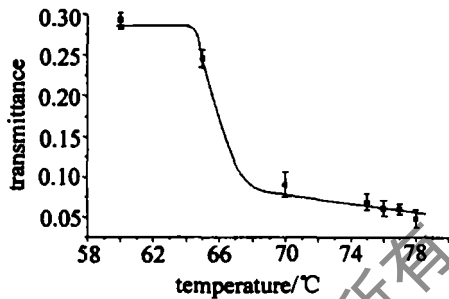


Fig 4 Transmittance of slice 2 at 10.6μm

从图 4中可以看出, 2号片在低温半导体态对红外波段激光的透过率较小,这是由于 VO₂ 薄膜制备在锗基片上,锗对 10.6μm 的 CO₂ 激光透过率只有 40%,所以刨除锗基片对透过率的影响,VO₂ 薄膜透过率是从 60°C时的 74%变到 78°C时的 11.93%。

2 结 论

采用不同参数,用磁控溅射法制备了 VO₂ 薄膜,对薄膜进行了 X射线电子能谱仪(XPS)测试,得到了

薄膜内部组成成分的信息,并通过拟合来得到 3, 4, 5 价钒在薄膜中所占的比例。对薄膜进行退火处理提高了 4价钒在薄膜中含量,分析了退火对氧化钒薄膜中 4价钒含量的影响。对 VO₂ 薄膜的相变前后光学特性变化进行了研究,得到了一定温度范围内 VO₂ 薄膜对 10.6μm 激光的透过率变化曲线。

参 考 文 献

[1] YIN D C, XU N K, ZHANG J Y *et al*. Vanadium dioxide films with good electrical switching property [J]. J Phys 1996 D29(4): 1051~1057.
 [2] 王 骐, 范金荣. 红外制导武器抗激光致盲技术纵横谈 [J]. 现代防御技术, 2001, 29(6): 47~50.
 [3] 查子忠, 王 骐, 李学春 *et al*. VO₂ 薄膜对 TEA CO₂ 激光响应特性的实验研究 [J]. 光学学报, 1996, 16(8): 1173~1176
 [4] 刘金城, 鲁建业, 田雪松 *et al*. 磁控溅射法制备二氧化钒薄膜最佳参量的研究 [J]. 光子学报, 2003, 32(1): 65~67.
 [5] KRISHNA M G, DEBAUGE Y, BHATTACHARYA A K. X-ray photoelectron spectroscopy and spectral transmittance study of stoichiometry in sputtered vanadium oxide films [J]. Thin Solid Films 1998, 312: 116~122