

高功率激光系统空间滤波器的重要参数

聂喻梅, 邱基斯

重庆理工大学工程训练中心, 重庆 400054

摘要 提出空间滤波器的透镜焦距需同时满足真空度和透镜球差最小的要求, 滤波小孔的发散角必须小于某一定值才能有效滤除高频分量, 并由此计算出本文所用高功率激光系统中的空间滤波器的小孔孔径约为 20 倍衍射极限。同时, 分析了滤波小孔在光轴上所处位置的范围, 即得出只要处于距焦平面 1.04mm 的范围内都是合理的结论。利用光学设计软件 Fred 建立模型进行验证, 模拟结果表明, 根据本文提出的计算方法所设计出的空间滤波器能够有效地滤除系统中的高频分量和杂散光。

关键词 高功率激光; 空间滤波器; 焦距; 高斯光束; 焦深

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.10.008

Important Parameters of Spatial Filter in a High Power Laser System

NIE Yumei, QIU Jisi

Engineering Training Center, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract By means of reasonably mathematical approximation and numerical integration, the fact that the focal length of the lens in the spatial filter should simultaneously satisfy the requirement of vacuum and the minimum spherical aberration is presented. In order to filter the high frequency components, the divergence angle of the filter must be less than a certain value according to the system requirement. Therefore, the aperture of the filter hole used in the high power laser system is about 20 times of the diffraction limitation 1.04mm. In the meantime, the scope of the location of the filter hole in the optical axis is reasonable as long as the location is within the focal depth. In addition, the model was built by means of the optical design software for the validation via simulation. The key components and specifications are carefully analyzed; and new structure design and techniques are employed. The simulation results show that the designed spatial filter according to the method presented in here can effectively filter out the high frequency components and stray light in the system. In conclusion, the theoretical analysis indicates that the described method has reached the optimal design and it is feasible.

Keywords high power laser; spatial filter; focal length; Gaussian beam; focal depth

0 引言

随着强激光技术的广泛应用, 人们不断在激光器的高功率和高能量方面寻求突破, 并在高功率固体激光系统中取得重大进展。空间滤波器是大型复杂高功率激光系统中必不可少的器件之一^[1-3], 它能滤除傅里叶频谱中的高频分量、实现像传递、改变光束直径和隔离杂散光, 有效地改善系统的光束质量, 同时提高系统的可输出功率和可聚焦功率^[4]。空间滤波器的光学结构比较简单, 由一对共焦正透镜和在公共焦点处的一个滤波小孔组成^[5], 如图 1 所示。空间滤波器的第一个透镜对光束进行傅里叶变换, 空间频率越高的成分距离焦斑中心越远, 在焦斑处的小孔就能够拦截掉高频成分, 光束经空间滤波器后透镜进行傅里叶逆变换后实现了低通滤波^[6-8]。

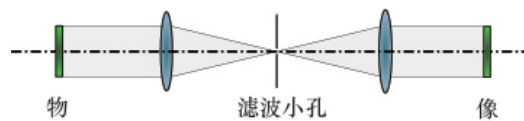


图 1 空间滤波器的结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of spatial filter

鉴于空间滤波器在高功率激光系统中的巨大作用, 其自身参数如透镜焦距、滤波小孔孔径等的选择变得至关重要。本文结合所用高功率激光器, 详细介绍空间滤波器中透镜焦距、滤波小孔孔径和滤波小孔在光轴上所处位置的计算方法, 使用光学设计软件 Fred 验证其功效。

收稿日期: 2010-09-07; 修回日期: 2011-03-03

作者简介: 聂喻梅, 高级工程师, 研究方向为激光器、激光放大器, 电子邮箱: nym@cqu.edu.cn

1 空间滤波器中的重要参数

1.1 透镜焦距

由空间滤波器的光学结构图(图1)可知,空间滤波器两透镜的口径比等于其焦距比。入射透镜的焦距一旦确定,出射透镜的焦距也就决定了,可见入射透镜焦距的选择在空间滤波器的设计中占据着重要地位。计算入射透镜焦距时主要考虑以下两个问题。

(1) 滤波器的真空度要求。在入射光束发散角一定的条件下,入射透镜像方焦面上光斑尺寸与透镜焦距成正比,此光斑即为滤波小孔处的光斑。同时,光斑的功率密度与光斑尺寸平方成正比。当光斑功率达到一定程度,小孔处将产生空气击穿。避免这种情况发生,就要求滤波器具有一定的真空度,并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、简化结构,应尽量增大入射透镜焦距。

(2) 使球差最小。在激光系统中,透镜球差是影响透镜波前的最重要因素,因此应通过合理选取空间滤波器的透镜焦距,使得球差最小。对于空气中的单个透镜,焦距 f 可由下面方程计算:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \frac{(n-1)^2 l}{nr_1 r_2} \quad (1)$$

式中 l 为透镜厚度(图2)。在透镜中,实际焦距随着入射光线进入透镜的距离 h 而改变,球差为

$$\Delta = \frac{1}{2} kh^2$$

其中,

$$k = \frac{f^2(n-1)}{n^2} \left[\frac{1}{n^3} + \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{r_2} \right) \left(\frac{n+1}{f} + \frac{1}{r_2} \right)^2 \right]$$

当半径比为

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{n+4-2n^2}{n+2n^2} \quad (2)$$

球差 Δ 的值最小。由于大型高功率激光系统光路极其复杂,本文意在举例说明空间滤波器的参数是如何确定的,故将模型简化为只考虑进入空间滤波器前后的这一小段光路。假设波长为1053nm,入射光斑为10mm×10mm的方形光斑,通过空间滤波器1:1成像。式(1)、式(2)给出的是焦距与透镜曲率半径之间的关系,本文利用光学设计软件Zemax构建模型,通过优化函数对一些问题进行限制,合理选取了空间滤波器的焦距 $f=690$ mm。

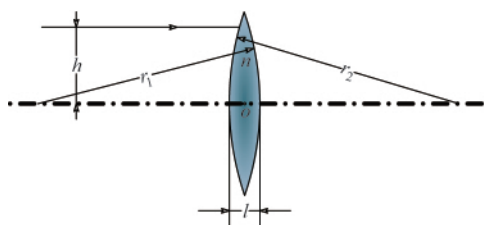


图2 透镜焦距计算示意

Fig. 2 Schematic diagram of lens focal length calculation

1.2 滤波小孔的直径

在空间滤波器的设计过程中,滤波小孔的直径是一个重要的参数。这是由于孔径尺寸过大会导致高频分量不能很好的滤除,而过小又会损失过多的能量。在确定高功率激光装置滤波小孔直径时,一方面须考虑抑制光束中增长最快的频率成分,另一方面又要兼顾尽可能高的透过率以便减小系统损耗。光传输理论与模拟计算表明,焦斑光强分布主要取决于入射光束强度与相位的空间调制波长 Λ (或频率)。空间调制波长为 Λ 的成分所对应的发散角 θ_L (半角)为

$$\theta_L = \frac{\lambda}{\Lambda}$$

其中 λ 为激光波长。本文所用装置的激光波长 $\lambda=1053$ nm, $\theta_L \leq 2.5$ mrad的范围内对应于光束的衍射极限,原则上这部分所包含的激光能量越多越好。根据光传输模拟计算,本文所用高功率激光系统对空间滤波器要求 $\theta_L \leq 50$ mrad,约为20倍衍射极限。 $\theta_L > 50$ mrad对应于光束调制波长 Λ 较小的区域,即高频调制部分,主要来源于光学元件的瑕疵和光路中的灰尘在传输过程中的衍射效应和非线性增长。这部分高频噪声非线性增长的增益较高,将导致激光束的小尺度自聚焦,因此必须利用空间滤波器小孔将其滤除。因此,本文小孔的孔径选用20倍衍射极限的直径。艾利斑直径 D_A 为

$$D_A = \frac{2.44\lambda f}{D} \quad (3)$$

其中, D 为入射光斑口径。当入射光斑是圆形时, D 取其直径;若入射光斑是正方形,则 D 取其对角线长度。小孔的孔径为

$$d = 20D_A$$

将 $\lambda=1053$ nm, $f=690$ mm, $D=10\sqrt{2}$ mm代入式(3),有

$$d = 2.51$$
mm

1.3 滤波小孔在光轴上的位置

将光束按高斯光束进行计算(参考图3),经过空间滤波器第一片透镜汇聚后光腰半径 ω'_0 为

$$\omega_0'^2 = \frac{\omega_0^2}{\left(1 - \frac{z}{f}\right)^2 + \left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda f}\right)^2} \quad (4)$$

式中, z 为入射光束的光腰位置, ω_0 为光腰半径, f 为透镜的焦距, λ 为入射光的波长。由于 λ 为 10^{-3} mm量级,因此有

$$\left(\frac{\pi\omega_0^2}{\lambda f}\right)^2 \gg \left(\frac{f+z}{f}\right)^2$$

于是,式(4)可以简化为

$$\omega_0' = \frac{\lambda f}{\pi\omega_0} \quad (5)$$

代值后,求得 ω_0' 为0.033mm。由此,计算出瑞利长度为

$$z_0 = \frac{\pi\omega_0'^2}{\lambda} = 3.25$$
mm

传播轴线上 z 坐标处光束等相位面上的光斑半径为

$$\omega(z) = \omega_0' \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

通常,光斑尺寸为光腰光斑的1.05倍被看作是小孔光阑

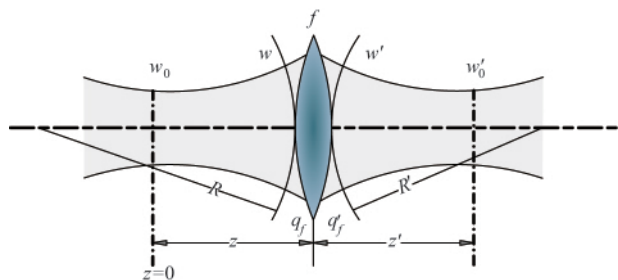
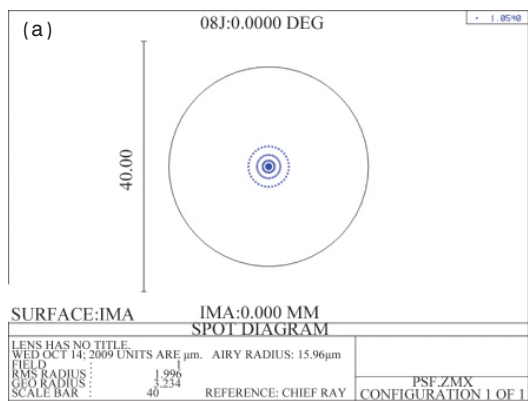


图 3 高斯光束计算示意

Fig. 3 Schematic diagram of Gaussian beam calculation

位于合理位置的光斑极限, 1.05 倍的光腰光斑对应的光斑半径为



$$\omega(z_{1.05}) = 1.05\omega'_0$$

将式(5)代入上式, 得焦深为

$$z_{1.05} = 0.32z'_0 = 1.04\text{mm}$$

因此, 滤波小孔并不一定恰好位于透镜的焦点处, 本文所用高功率激光系统中滤波小孔放置在焦深范围内即在焦平面前后 1.04mm 的范围内都是合理的。

按照上面的计算方法, 空间滤波器中透镜焦距和滤波小孔孔径以及滤波小孔在光轴上的位置就确定下来了。再次通过 Zemax 进行像差优化和波相差优化, 将各参数做细微局部调整后, 空间滤波器的点列图和波相差分别如图 4 所示。可以看出, RMS Radius 和 GEO Radius 的值已经很小, 光束经空间滤波器后像质良好。

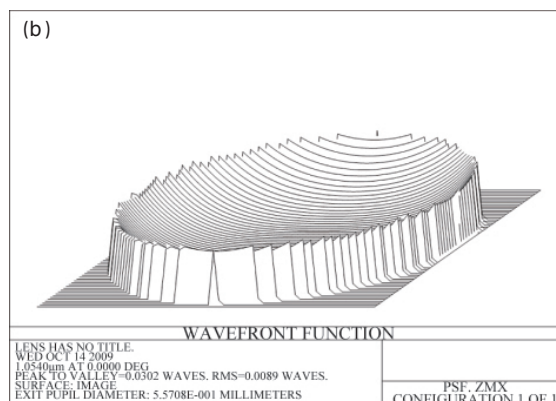


图 4 空间滤波器的点列图(a)和波相差(b)

Fig. 4 Spot diagram (a) and wavefront function (b) of the spatial filter

2 模拟验证

按照前面计算出的空间滤波器参数, 利用光学设计软件 Fred 建立模型验证。首先让波长 1053nm、光斑直径 2mm 的激光光束通过一个 8 倍扩束镜组使光斑直径达到 16mm, 随后让其通过 10mm×10mm 的方形光阑得到 10mm×10mm 的方

形光斑, 并通过空间滤波器, 在空间滤波器后 500mm 处放置一个接收面, 测其光照度分布, 光路示意图如图 5 所示。图 6 给出了有无放置空间滤波器情况下, 接收面的光照度分布。可以看出, 根据上述计算方法所设计的空间滤波器成功地滤除了系统中的一些高频分量和杂散光。

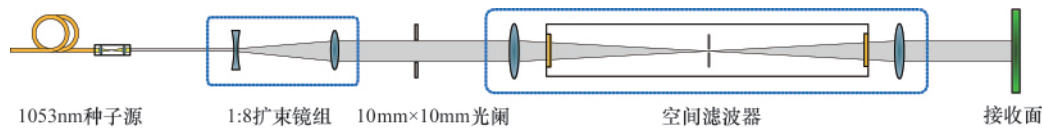


图 5 光路示意

Fig. 5 Schematic diagram of optical path

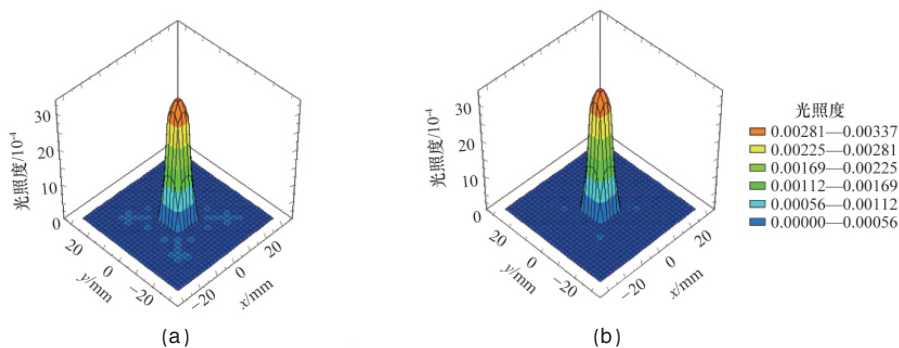


图 6 有(b)无(a)空间滤波器的光照度对比

Fig. 6 Comparison diagram of illumination with (b) or without (a) spatial filter

3 结论

本文结合某大型高功率激光系统,详细介绍了所用空间滤波器中透镜焦距和滤波小孔孔径以及滤波小孔在光轴上所在位置的计算方法。在激光系统中,透镜球差是影响透射波前的最重要因素,空间滤波器的透镜焦距在设计时,在满足滤波器真空度要求的同时应使球差最小。结合某大型高功率激光系统,经计算得出当透镜焦距为 690mm 时,可以保证球差最小。此外,当空间滤波器小孔孔径选用 2.51mm(约 20 倍衍射极限)时,能够满足系统对空间滤波器发散角的设计要求,有效滤除系统中的高频分量。同时,按照高斯光束计算求得焦深为 $0.32z_0$,滤波小孔可以放置在偏离焦平面 1.04mm 的范围内。最后,借助光学设计软件 Fred 建立模型对比了系统中有无空间滤波器时接收面上光照度的变化,研究结果表明按文中所述参数设计的空间滤波器可以有效滤除系统中的高频分量和杂散光。本文的计算方法可推广于其他类型的光束通过空间滤波器,以及高功率激光装置中多级空间滤波器研究。

参考文献 (References)

- [1] Simmons W. A high energy spatial filter for removal of small scale beam instabilities in high power solid state laser [J]. *IEEE Journal of Quantum*

Electronics, 1975, 11(9): 852.

- [2] Hunt J T, Renard P A, Simmons W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(4): 779-782.
- [3] Simmons W, Speck D R, Hunt J T. Argus laser system: Performance summary[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(7): 999-1005.
- [4] 徐世祥, 管富义, 林尊琪, 等. 高功率激光系统空间滤波器透镜焦距的选择及其测量[J]. 中国激光, 1996, 23(12): 1077-1080.
Xu Shixiang, Guan Fuyi, Lin Zunqi, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 1996, 23(12): 1077-1080.
- [5] 夏兰, 钱列加, 王世绩. 高能飞秒激光系统中空间滤波器的研究和设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 124-128.
Xia Lan, Qian Liejia, Wang Shiji. *High Power Laser and Particle Beams Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, 15(1): 124-128.
- [6] 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.
- [7] 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理 [M]. 4 版北京: 国防工业出版社, 2002: 61-88.
Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. *Principles of laser*[M]. 4th ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 61-88.
- [8] 王桂英, 赵九源, 张明科, 等. 钎玻璃高功率激光系统中的空间滤波器的基本研究[J]. 物理学报, 1985, 34(2): 171-181.
Wang Guiying, Zhao Jiuyuan, Zhang Mingke, et al. *Acta Physica Sinica*, 1985, 34(2): 171-181.

(责任编辑 朱宇)

·学术动态·

“2011 中国机械动力学学术会议”征文

由中国振动工程学会机械动力学学会主办的“2011 中国机械动力学学术会议”将于 2011 年 7 月 29—31 日在杭州召开。

征文范围: 机械动力学理论与方法; 机床动力学; 动态测试与信号分析; 机械系统故障诊断; 振动分析与控制; 噪声分析与控制; 切削动力学; 机械动态设计; 各类工程中的机械动力学理论及应用。

联系方式: 北京市海淀区清华大学精密仪器与机械学系 (100084) 阎绍泽; 联系电话: 010-62796046; 电子信箱: wjhxhy2011@yahoo.com.cn。

会议网址: www.csmd.com.cn/。

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。