

激光聚光系统中激光光学与几何光学 设计参数间的差异研究

李成江

(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 针对一结合激光光学理论设计的激光聚光系统, 本文运用矩阵光学理论精确地计算了高斯光束经过该系统变换后的主要设计参数, 并与几何光学的设计参数进行了比较。

关键词: 光学设计 矩阵光学

Research on differences of design parameters between laser optics and geometrical optics in laser focusing system

Li Chengjiang

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology)

Abstract: According to a laser focusing system design with the help of theory of laser optics, the main design parameters of Gaussian beam passing through the system are precisely calculated by using matrix optics. These parameters are compared with the design parameters of using geometrical optics in this paper.

Key words: optical system design matrix optics



- 14 Ruotagi K C, Flytzanis C. Opt Lett, 1984;9(8);344~346
- 15 Zheng J P, Work H S. JOSA(B), 1992;9(11);2047~2052
- 16 Nuss M C, Zinth W, Aiser W. A P L, 1986;49(25);1717~1719
- 17 Ippen E P, Liu L Y, Haus H A, Opt Lett, 1990;15(3);183~185
- 18 Wang J. Opt Lett, 1991;16(14);1104~1106
- 19 Kryukov P G, Letokhov V S. IEEE J Q E, 1972;QE-8(10);766~781

* * *

作者简介: 孙逊, 男, 1971 年 1 月出生, 硕士研究生, 主要从事激光超快现象、光与物质相互作用及凝聚态物质能带论等方面的研究。

一、引言

激光光学系统一般分为两大类,即准直系统与聚光系统。高斯光束与光导纤维之间的耦合光学系统即为一聚光系统。一般由激光器出射的高斯光束的束腰直径在几百个微米左右,在想将其变换到几个微米时,则给耦合光学系统的设计提出了很高的要求,甚至用普通几何光学系统设计理论几乎无法实现这一目的。针对这一问题,结合激光光学理论,本文作者曾提出了一种激光聚光光学系统的设计方法^[1]。本文对一运用这种方法设计的激光聚光系统,用矩阵光学理论进行了推导、计算,从而得到了高斯光束经该系统变换后的精确参数;同时通过比较,得出了激光光学与几何光学设计参数之间的差异,为激光聚光光学系统的研究提供了资料。

二、激光聚光光学系统

激光光学中^[2],在物方 S_0 处腰斑半径为 w_0 的高斯光束,经一光学系统变换后,在象方 S_i 处有新的腰斑半径 w_i 。光学系统设计中,将高斯光束物方束腰视为物,象方束腰视为象,则物高为 $2w_0$,象高为 $2w_i$,在高斯光束与光纤耦合系统中,象高 $2w_i$ 应小于光纤芯直径;将高斯光束在光学系统的第一镜面处(物距为 S_0)的发散角 U_0 视为物方孔径角,在最后一个出射面处的发散角视为象方孔径角,在象面处的发散角应小于光纤数值孔径半角;考虑到高斯光束经球面光学系统后的衍射损耗,通光孔径应以高斯光束光斑在光学系统内部最大直径的 1.5 倍为宜。 w_0 可由激光腔的结构参数求得, w_i 由光纤芯径确定; U_0 可由高斯光束发散角公式计算。

设计思想为:首先将聚光系统等效为一单薄透镜,利用激光光学中单薄透镜的参数公式,在选定高斯光束变换前参数 S_0, w_0, U_0, λ (激光波长)后推导出系统总焦距 f'_s ;然后用几何光学理论设计满足系统总焦距、象方后截距、象差等要求的聚光光学系统;最后依据该系统的设计参数用激光光学理论计算高斯光束经该聚光系统变换后的参数 w_i, S_i 。修改聚光系统设计参数,直到 w_i, S_i 满足设计要求。

Table The design parameters of the laser focusing system

number of surface	radius	axial interval	half of clear aperture	name of glass	refractive index	number of lens
1	-6.0824	0.000	0.311			
2	53.6094	1.000	0.331	K9	1.5147	1
3	55.6127	47.309	1.933			
4	-30.5540	1.800	1.942	ZF3	1.7125	2
5	11.6632	0.500	1.916			
6	40.5221	1.800	1.764	ZF3	1.7125	3
7	-16.7345	2.000	1.530			
8	-65.4014	1.300	1.493	ZF7	1.7999	4
9	6.2517	0.500	1.447			
10	50.8011	2.800	1.098	ZK10	1.6198	5
11	0.0000	5.423	0.004			

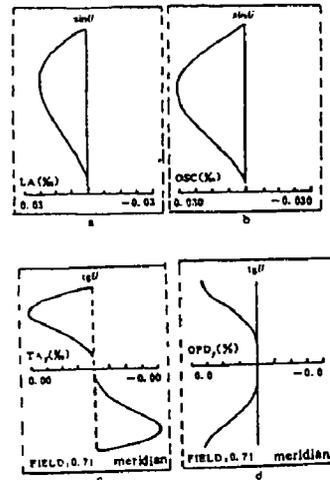


Fig. 1 The aberration curves
 a - spherical aberration b - coma aberration c - lateral aberration d - wave aberration

下面为本文作者依据上述设计思想所做的聚光系统设计实例,该实例实现了 He-Ne 激光的输出通过一个高质量成象系统耦合到单模保偏光纤(芯径为几个微米)上去的目的,该系统将高斯光束腰斑半径由 0.2953mm 压缩至 $1.14\mu\text{m}$ 。设计参数为: $S_0=140\text{mm}$, $U_0=0.0002\text{rad}$, $w_0=0.2953\text{mm}$, $\lambda=0.6328\mu\text{m}$, $w_i=1.14\mu\text{m}$, $f_g'=1.75\text{mm}$ 。附表与图 1 为该组参数的聚光系统几何光学自动优化设计结果^[1,3]。

由附表中可以看出,聚光系统最后一出射面与象面之间的间隔为 5.423mm ,理想象高之半为 $3.65\mu\text{m}$ 。

三、高斯光束经聚光系统变换后参数的计算

如图 2 所示, r_1, r_2 分别为透镜前后两表面半径; l_H, l_H' 分别为前后主面与透镜前后顶点之间距离; f, f' 分别为透镜的前后焦距; n 为透镜材料折射率; d 为透镜厚度。厚透镜焦距公式和主面位置公式可分别表示为:

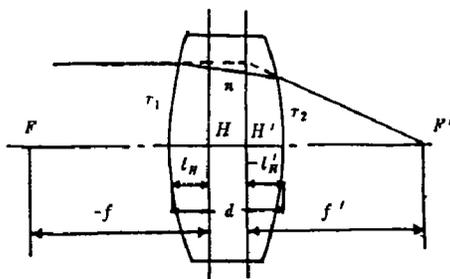


Fig. 2 Model of thick lens

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

$$l_H' = \frac{n-1}{nr_1} d f' \quad (2)$$

$$l_H = -\frac{n-1}{nr_2} d f' \quad (3)$$

设透镜 1 至 5 的焦距分别为 $f_1', f_2', f_3', f_4', f_5'$, 主面位置分别为 $l_{H1}, l_{H1}', l_{H2}, l_{H2}', l_{H3}, l_{H3}', l_{H4}, l_{H4}', l_{H5}, l_{H5}'$ 。

由公式(1), (2), (3)和附表中的数据可以计算出下列参数: $f_1' = -10.5531$, $f_2' = 27.9196$, $f_3' = 22.4036$, $f_4' = -28.4523$, $f_5' = 11.2320$, $l_{H1} = 0.0669$, $l_{H1}' = 0.5896$, $l_{H2} = 0.3760$, $l_{H2}' = 0.6843$, $l_{H3} = -0.4140$, $l_{H3}' = 1.4386$, $l_{H4} = -0.2513$, $l_{H4}' = 0.9823$, $l_{H5} = -0.2369$, $l_{H5}' = 1.9249$ 。

又设聚光系统的传播矩阵为 M , 且

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$$

设透镜 1 至 5 的传播矩阵分别为 M_1, M_3, M_5, M_7, M_9 , 相邻透镜之间间隔的传播矩阵依次为 M_2, M_4, M_6, M_8 。

由矩阵光学理论可知,聚光系统的总体传播矩阵 M 可表示为 $M = M_9, M_8, M_7, M_6, M_5, M_4, M_3, M_2, M_1$; 自由空间与厚透镜的传播矩阵分别为:

$$\begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{与} \quad \begin{bmatrix} 1 - \frac{l_H'}{f'} & \frac{d}{n} \\ -\frac{1}{f'} & 1 - \frac{l_H}{f'} \end{bmatrix}$$

其中, l 为空间距离。

将上述透镜参数代入自由空间和厚透镜的传播矩阵, 可得:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1.0559 & 0.6602 \\ 0.0948 & 1.0063 \end{bmatrix}; \quad M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 47.3090 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_3 = \begin{bmatrix} 0.9865 & 1.0511 \\ -0.2358 & 0.9755 \end{bmatrix};$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_5 = \begin{bmatrix} 0.9358 & 1.0511 \\ -0.0446 & 1.0185 \end{bmatrix}; \quad M_6 = \begin{bmatrix} 1 & 2.0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_7 = \begin{bmatrix} 1.0345 & 0.7223 \\ 0.0351 & 0.9912 \end{bmatrix}; \quad M_8 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_9 = \begin{bmatrix} 0.8287 & 1.7286 \\ -0.0890 & 1.0211 \end{bmatrix};$$

$$M_{9,8} = M_9 \cdot M_8 = \begin{bmatrix} 0.3287 & 2.1430 \\ -0.0890 & 0.9766 \end{bmatrix}; \quad M_{9,7} = M_{9,8} \cdot M_7 = \begin{bmatrix} 0.9325 & 2.7227 \\ -0.0578 & 0.9037 \end{bmatrix};$$

$$M_{9,6} = M_{9,7} \cdot M_6 = \begin{bmatrix} 0.9325 & 4.5877 \\ -0.0578 & 0.7881 \end{bmatrix}; \quad M_{9,5} = M_{9,6} \cdot M_5 = \begin{bmatrix} 0.6680 & 5.6527 \\ -0.0892 & 0.7419 \end{bmatrix};$$

$$M_{9,4} = M_{9,5} \cdot M_4 = \begin{bmatrix} 0.6680 & 5.9867 \\ -0.0892 & 0.6973 \end{bmatrix}; \quad M_{9,3} = M_{9,4} \cdot M_3 = \begin{bmatrix} 0.4447 & 7.5422 \\ -0.1130 & 0.5865 \end{bmatrix};$$

$$M_{9,2} = M_{9,3} \cdot M_2 = \begin{bmatrix} 0.4447 & 27.5805 \\ -0.1130 & -4.7594 \end{bmatrix};$$

$$M_{9,1} = M = M_{9,2} \cdot M_1 = \begin{bmatrix} 3.0842 & 28.0478 \\ -0.5705 & -4.8640 \end{bmatrix}.$$

取 $S_0 = 140\text{mm}$, $w_0 = 0.2953\text{mm}$, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$, 将上述求得的 M 中的参数代入高斯光束经光学成像系统后的变换公式(见文献[2]中第86~87页):

$$S_0 m_{11} + S_i m_{22} + S_0 S_i m_{21} m_{12} = - \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)^2 \frac{m_{21}(m_{11} + S_i m_{21})}{m_{22} + S_0 m_{21}} \quad (4)$$

$$w_i = w_0 |m_{11} + S_i m_{21}| \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)^2 \frac{m_{21}^2}{(m_{22} + S_0 m_{21})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

得: $w_i = 1.12\mu\text{m}$, $S_i = 5.4083\text{mm}$.

由图1与附表中的几何光学系统的设计结果可知:最后一出射面与象面之间间隙为 5.423mm ,理想象高之半为 $3.65\mu\text{m}$.

由此可见,由激光光学理论计算得出的象距与普通几何光学设计方法得到的象距之间仅存在一微小差别,但由该两种方法得到的象高之间差别是相当大的,后者已接近前者的四倍,当需要考虑高斯光束束腰大小经过光学成像系统的变化时,不能直接采用理想光学系统的设计结果,必须用激光光学理论加以计算,否则将导致错误的结果。

参 考 文 献

- 1 李成江. 自校整空间位移测量仪精度分析及耦合光学系统设计. 长春光机学院硕士论文, 1989
- 2 吕百达. 激光光学. 成都, 四川大学出版社, 1986
- 3 翁志成, 孙国良. 计算机辅助光学设计 CAOD 软件系统. 光学机械, 1987, 4-5:1

作者简介: 李成江, 男, 1962年出生. 助理研究员, 硕士. 从事教学与科研两方面工作, 主要科研方向为光学。

收稿日期: 1993-11-10 收到修改稿日期: 1994-02-23