文章编号:1002-2082(2011)06-1098-05

近紫外-可见光宽波段复消色差显微物镜设计

陈　姣,焦明印,常伟军,康文莉,胡　博,张凤娟,崔海云

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

摘　要:设计了波段 300 nm～500 nm,放大倍率为 $10^{\times}$,NA=0.3 的近紫外-可见光显微物镜,用于观测激光照射核聚变的成像过程。该系统采用透射式结构,通过 P、W 设计方法和 CODE-V 软件的优化,实现了系统的复消色差,较好地解决了紫外光学材料种类少、折射率低带来的像差校正困难和光学系统效率不高的问题。

关键词:复消色差;近紫外-可见光;显微物镜; PW 法

中图分类号:TN202;TH703　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.5768/JAO201132.0601009

Optical design of apochromatic microscope objective for near ultraviolet-visible wide spectrum

CHEN Jiao, JIAO Ming-yin, CHANG Wei-jun, KANG Wen-li, HU Bo, ZHANG Feng-juan, CUI Hai-yun

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065,China)

Abstract: A customized microscope objective for near ultraviolet (UV)-visible spectrum was designed, which was used to observe the image of nuclear fusion irradiated by laser. The operation wavelength was 300 nm～500 nm, the magnification was $10^{\times}$ and the numerical aperture (NA) was 0.3. The transmission-mode structure was established in the microscope objective, by theoretical calculation with PW method and optimization with CODE-V, the apochromatism was achieved. Thus, the problems such as difficult aberration correction and low efficiency of optical system, resulted from the few kinds of UV optical materials and low refractive index, could be solved.

Key words: apochromatism; near UV-visible; microscope objective; PW method

引言

激光照射核聚变是目前普遍采用的一种人工可控核聚变技术,该核聚变在 300 nm～500 nm 波段范围的发光最好,易于观测,在实验中迫切需要设计一个复消色差的近紫外-可见光显微物镜,对核聚变过程中微小物质的变化情况进行光学放大成像并实时观测。

根据技术要求,需设计显微物镜的放大倍率为 $10^{\times}$,物方数值孔径 NA=0.3,光学系统分辨率<5 μm,物镜的视场范围>2 nm,消色差在 300 nm～500 nm 范围内,物镜系统的最大外径<200 mm,物镜系统前端面的光学元件到物点距离>70 mm,物镜系统后端面到像点距离>300 mm,物镜系统后端面的光学元件到物点的距离约为1 350 mm。

1　外形尺寸计算

要使中倍显微物镜在校正球差、彗差、轴向色

收稿日期:2011-03-29;　**修回日期**:2011-06-01

作者简介:陈姣(1986－),女,陕西蒲城人,西安应用光学研究所硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。
E-mail:chenjiao042@163.com

差的基础上还能够校正像散,须采用2个分离的薄透镜组构成其系统结构,其结构示意图如图1所示。为了便于像差校正,在显微物镜设计中按反向光路计算,靠物方的一组叫前组,靠像方的一组叫后组。

设2个透镜组的光焦度分别为 ϕ_1 和 ϕ_2,第一辅助光线在后组上的入射高度为 h_1,在前组上的入射高度为 h_2,在2个透镜组上的偏角分别为 Δu_1 和 Δu_2,像距为 l,物距为 l'。根据设计指标要求,取共轭距 $L=1\ 800$ mm。

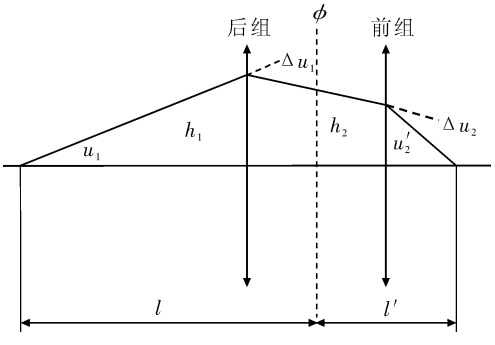

图1　物镜的结构示意图

Fig. 1　Structure of objective

由于

$$l'-l=1800 \qquad \frac{l}{l'}=-10$$

则由 $\frac{1}{l'}-\frac{1}{l}=\frac{1}{f'}$ 即可计算系统焦距 f'。

因为 $u_1=\frac{0.3}{-10}=-0.03$,则 $\Delta u=0.33$。偏角分担时可按 0.45∶0.55,即后组偏角 $\Delta u_1=0.148\ 5$,前组偏角 $\Delta u_2=0.181\ 5$。

由 $h_1=lu_1$,$h_1\phi_1=\Delta u_1$,$h_2=l'u_2'$,$h_2\phi_2=\Delta u_2$,分别得后组和前组焦距:

$$f_1'=303\ \text{mm},\ f_2'=165\ \text{mm}$$

2　光学材料的选择

紫外波段一般工程上多采用熔石英、氟化钙、氟化镁,但这几种材料的色散系数差别不大,给色差校正带来了一定的困难。下面对熔石英及氟化钙的色散特性加以分析:

$$\text{阿贝数}\ v=\frac{n_2'-1}{n_3'-n_1'} \tag{1}$$

$$\text{相对部分色散}\ p=\frac{n_2'-n_1'}{n_3'-n_1'} \tag{2}$$

式中 n_1'、n_2'、n_3' 分别对应 $\lambda_1=300$ nm、$\lambda_2=400$ nm、$\lambda_3=500$ nm 的折射率,由(1)式和(2)式可得几种材料的阿贝数及相对部分色散值,见表1所示。

表1　几种常用紫外材料的色散特性

Table 1　Dispersion characteristics of sveral UV materials

材料	阿贝数(v)	相对部分色散(p)
CaF_2	25.246	0.697
熔石英	18.435	0.694
MgF_2	161.67	0.500

本课题选择光学材料时,理论上只要选择 p 值相等 v 值不等的两种玻璃组合就可消除二级光谱。由表1可知 CaF_2 的相对部分色散 p_1 与熔石英的相对部分色散 p_2 基本相等,且二者的阿贝数 v_1 和 v_2 不等,而 MgF_2 的相对部分色散 p_3 与 p_1、p_2 相差很大,因此选用 CaF_2 和熔石英为宜,对其进行合理的光焦度分配便可实现复消色差。而消色差的基本原则是正透镜选用 v 值大的材料,负透镜选用 v 值小的材料,综合考虑材料的理化性能,负透镜比较适宜的材料为熔石英,正透镜可选用的材料为 CaF_2。

3　初始结构的考虑

如图1所示,在规化条件下,第一辅助光线通过系统的总偏角 $\Delta u=1$。设定两透镜组的偏角分别为:$\Delta u_1=0.45$,$\Delta u_2=0.55$,透镜组之间的间隔为 d。在该系统结构中,如果两透镜组密接,则像散为常数,无法校正,所以两透镜组之间的间隔 d 显然不能太小,但是也不能太大,因为间隔越大,物镜的工作距离越小,对使用不方便。究竟采用什么样的间隔应该由3个方面因素来决定,一方面能够保证像散校正,另一方面尽量减小孔径高级球差,同时还要满足适当的工作距离[1]。结合上述因素,为了计算方便取 d 为1。

在规化条件 $h=f'=J=1$ 下,通过高斯公式计算得到系统的外部参数有:

$$h_1=1.0,\ h_2=0.55,\ h_{p1}=0,\ h_{p2}=1.0$$

利用计算出的外部参数及系统校正球差、彗差和像散的要求即可列出相应的初级像差方程式:

$$S_{\mathrm{I}}=\sum hP=h_1P_1+h_2P_2=0 \tag{3}$$

$$S_{\mathrm{II}}=\sum h_pP-J\sum W=h_{p2}P_2-(W_1+W_2)=0 \tag{4}$$

$$S_{\mathrm{III}}=\sum\frac{h_p^2}{h}P-2J\sum\frac{h_p}{h}W+J^2\sum\phi=$$

$$\frac{h_{p2}^2}{h_2}P_2-\frac{2h_{p2}}{h_2}W_2+1.45=0 \tag{5}$$

式中:$P=\sum_1^k\left(\frac{\Delta u}{\Delta\frac{1}{n}}\right)^2\Delta\frac{u}{n}$;$W\overset{k}{=}_1\left(\frac{\Delta u}{\Delta\frac{1}{n}}\right)\Delta\frac{u}{n}$。

3.1 光焦度的分配

初始结构由前组和后组两部分组成,由于该系统是在近紫外-可见光波段下设计的,而应用于紫外波段的光学材料色散差异较小,若每个镜组采用双胶合透镜,则分配到各个透镜上的光焦度较大,使得高级像差较大不好控制。为了减小系统内每块透镜的相对孔径,从而减小高级像差,在光学设计中常采用透镜分离的方法。在胶合物镜基础上分裂出一片正透镜就构成二组三片式物镜,根据本设计中所选材料,正透镜向后分裂并且光焦度分配以前部分光焦度 $\varphi_{fr}=0.4$ 和后部分光焦度 $\varphi_{ha}=0.6$ 为宜。三片式物镜材料选择同二片式一样,一般选两块正透镜为同一种材料,正负透镜应具有一定的阿贝常数差和折射率差,而折射率较高的玻璃对减小高级球差有利。因此两组均由双胶合透镜在前、正透镜在后的结构组成,且正透镜选用 CaF_2 材料,负透镜选用熔石英,即 n_1、n_2 分别为 CaF_2 和熔石英的折射率,且 $n_3=n_1$。本文在 300 nm~500 nm 紫外波段,则 $n_1=n_3=1.44$,$n_2=1.47$。

下面用 PW 方法求解双胶合透镜组在前的三片式透镜组结构参数。设 φ_1、φ_2、φ_3、v_1、v_2、v_3 分别代表 3 个透镜的光焦度及阿贝数,根据消位置色差要求,在规化条件下,有:

$$\begin{cases}\frac{\varphi_1}{v_1}+\frac{\varphi_2}{v_2}+\frac{\varphi_3}{v_3}=0\\ \varphi_1+\varphi_2+\varphi_3=1\\ \varphi_{12}=\varphi_1+\varphi_2\end{cases} \tag{6}$$

如前所述,三片式是在胶合物镜基础上分裂出一片正透镜,且通常以前部分光焦度 $\varphi_{fr}=0.4$ 和后部分光焦度 $\varphi_{ha}=0.6$ 为宜,即方程组(6)中 $\varphi_{12}=0.4$,$\varphi_3=0.6$。最终解得,

$$\varphi_1=3.11,\varphi_2=-2.71,\varphi_3=0.6$$

3.2 物镜结构参数的计算

3.2.1 前组和后组中透镜结构参数的计算

对于前组,$\varphi_1=3.11$,$\varphi_2=-2.71$,根据双胶合透镜的结构参数和基本像差参量的关系式[2],可计算出:

$$A=a_1\varphi_1+a_2\varphi_2,B=b_1\varphi_1^2-b_2\varphi_2^2-2\varphi_2,C=c_1\varphi_1^3+c_2\varphi_2^3+(l_2+1)\varphi_2 \tag{7}$$

$$K=\frac{A+1}{2},L=\frac{B-\varphi_2}{3} \tag{8}$$

式中:a_1、b_1、c_1 是与 n_1 有关的中间量;a_2、b_2、c_2、l_2 是与 n_2 有关的中间量。由(7)式和(8)式可得到基本像差参量 P_{02}、Q_{02}、W_{02},随后根据物体位置的规化公式计算出 $\overline{P}_2^{\infty}$ 和 $\overline{W}_2^{\infty}$。利用双胶合物镜结构参数公式:

$$Q_2=Q_{02}-\frac{\overline{W}_2^{\infty}-W_{02}}{1.67} \tag{9}$$

$$c_2=Q_2+\varphi_1 \tag{10}$$

$$c_1=\frac{\varphi_1}{n_1-1}+c_2 \tag{11}$$

$$c_3=c_2-\frac{1-\varphi_1}{n_2-1} \tag{12}$$

求解出规化条件下 $\varphi_{12}=1$ 时的结构参数,而实际中 $\varphi_{12}=0.4$,故需将(10)式、(11)式和(12)式求解出的双胶合物镜结构参数转换为实际中的结构参数。

在该胶合物镜基础上向后分裂出一片正透镜,对于分裂出的第 3 片透镜,由单透镜的结构参数和基本像差参量的关系式[3]可求出与 n_3 有关的中间量 a_3、b_3、k_3、l_3,接下来由像差基本参量求解第 3 片单透镜的形状系数 Q_3:

$$Q_{12}=R-SQ_3 \tag{13}$$

式中:$R=\frac{(2+\frac{1}{n_3})\varphi_3}{\varphi_{12}K}-\frac{L}{K}-\frac{\varphi_3^2 l_3}{\varphi_{12}^2 K}$;$S=\frac{\varphi_1^2 k_3}{\varphi_{12}^2 K}$;$Q_{12}$ 是双胶合透镜的形状系数,即 Q_2 由(9)式可求得。

由(13)式确定出 Q_3 后,再利用单透镜的结构参数公式求解出规化条件下 $\varphi_3=1$ 时的结构参数,而实际中 $\varphi_3=0.6$,故需将求解出的单透镜结构参数转换为实际中的结构参数。

对于后组,因为前组与后组各个透镜的材料及光焦度分配均相同,所以其基本像差参量对应相等,即 $P_{01}=P_{02}$,$Q_{01}=Q_{02}$,$W_{01}=W_{02}$。同时根据消像差条件(3)式、(4)式和(5)式便可以计算出 P_1 和 W_1。下面把 P_1、W_1 用 $\overline{P}_1$、$\overline{W}_1$ 来表示:

$$P_1=(h_1\varphi_1)^3\overline{P}_1=(0.45)^3\overline{P}_1 \tag{14}$$

$$W_1=(h_1\varphi_1)^2\overline{W}_1=(0.45)^2\overline{W}_1 \tag{15}$$

又根据物体位置的规化公式

$$\overline{P}_1=\overline{P}_1^{\infty}+\overline{u}_1(4\overline{W}_1^{\infty}-1)+\overline{u}_1(3+2\mu) \tag{16}$$

$$\overline{W}_1=\overline{W}_1^{\infty}+\overline{u}_1(2+\mu) \tag{17}$$

在该光学系统中,解出 $\overline{P}_1^{\infty}$ 和 $\overline{W}_1^{\infty}$。同上理,根据 PW 法确定出后组中双胶合透镜的结构参数,再由分裂公式计算出单透镜的结构参数。

3.2.2　前透镜结构参数的计算

对于显微物镜来说,特别是中、高倍物镜,前透镜大多是承担大量偏角并带有齐明半径的单透镜。而物镜的前透镜不必列入像差系数方程组求解,可直接定出结构参数(r,n,d)。前片的折射率越高越好,阿贝常数 v 越大,垂轴色差就越小,因此,可选用 CaF_2 作为前片的材料。即给物方加一材料为 CaF_2 的厚平凸透镜,并且其凸面选的是第三类齐明点,在这种点上,球差、彗差、像散都为零,其半径可根据齐明条件来计算。

根据系统对物距的要求,取 $l_1=-70$,因 $r_1=\infty$,可得 $l_1'=-100.8$,取前片厚度 $d=20$,可得 $l_2=-120.8$。按齐明条件求得:

$$r_2=\frac{1.44\times(-120.8)}{1+1.44}=-71.29$$

4　优化及设计结果

PW 法是按理想光学系统,不考虑透镜厚度且在规化条件下求解光学系统初始结构的设计方法,但对于实际光学系统,必须给每个透镜以合适的实际厚度。同时,为了增加像差校正的变量,在实际设计中将前组和后组中的双胶合透镜改为双分离透镜组。为了平衡系统中的剩余像差,在前片 CaF_2 透镜前密接一个熔石英负透镜。经过最终的优化,得到满足像质要求的最终设计结果。

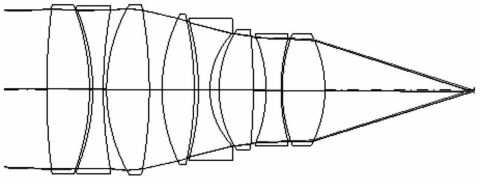

图 2　优化后的系统结构
Fig. 2　Optical system layout after optimization

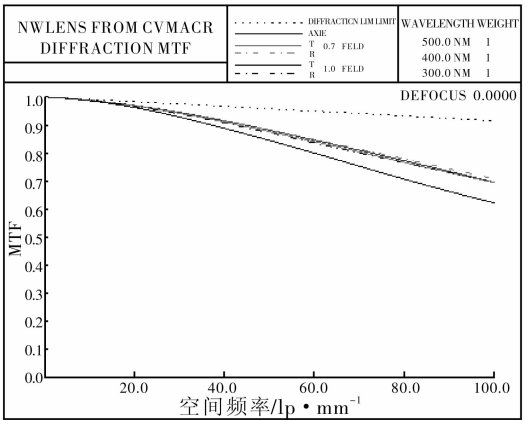

图 3　MTF 曲线
Fig. 3　MTF curves

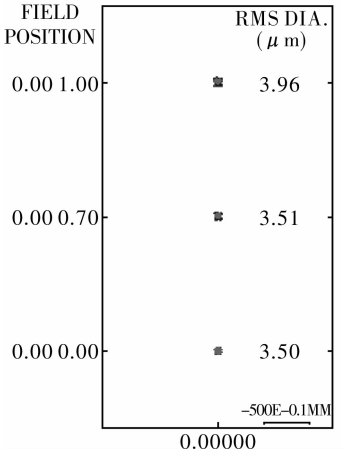

图 4　各个视场的弥散斑
Fig. 4　Spot diagram for different fields

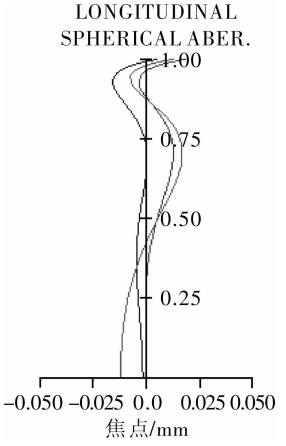

图 5　色球差曲线
Fig. 5　Spherochromatism curves

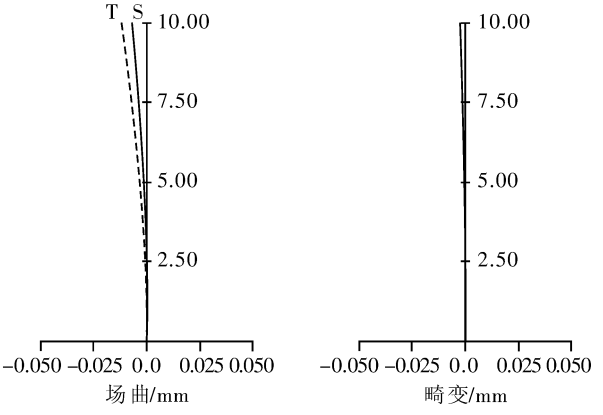

图 6　场曲曲线
Fig. 6　Field curvature

由设计结果可以看出,光学系统的放大倍率为 $10^{\times}$,分辨率<5 μm,物镜系统前端面到物点距离为 82 mm,后端面到像点距离为 377 mm,后端

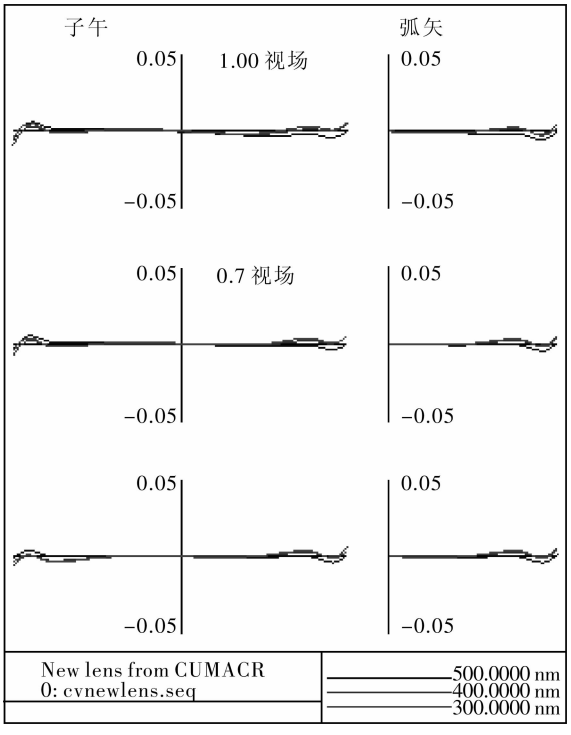

图 7 垂轴像差曲线

Fig. 7 Lateral aberrations

面的光学元件到物点的距离为 1 349.6 mm。在整个视场范围内,多色光的点列图弥散圆 RMS 半径值小于 5 μm,100 lp/mm 的 MTF 大于 0.6,0.3 μm、0.4 μm、0.5 μm 这 3 条谱线的二级光谱色差在公差范围内,实现了复消色差。并且像散、畸变、垂轴像差也得到很好的校正。因此,从上述分析结果可以看出,光学系统的像质优良,达到设计指标要求。

5 结束语

本文通过 PW 法计算得到了光学系统的初始结构,在此基础上,结合初级像差理论对该结构进行优化,设计了一种放大倍率为 10× 且共轭距离满足要求的近紫外-可见光显微物镜,对激光核聚变实验起到了一定的促进作用。

参考文献:

[1] 袁旭沧. 光学系统设计[M]. 北京:科学出版社,1988.
YUAN Xu-cang. Optical system designing[M]. Beijing:Science Press,1988. (in Chinese)

[2] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
WANG Zhi-jiang. Optical technology manual[M]. Beijing:China Machine Press,2007. (in Chinese)

[3] 茹志兵,华珂. 一种宽光谱紫外镜头的设计[J]. 应用光学,2003,24(1):11-14.
RU Zhi-bing,HUA Ke. Design of a wide spectral UV lens[J]. Journal of Applied Optics,2003,24(1):11-14. (in Chinese with an English abstract)