

引用格式: GUAN Yulong, ZHENG Xiaobing, ZHAI Wenchao. Lens Design of the Broadband Plan-apochromatic Microscope Objective[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(12):1223002

管鱼龙, 郑小兵, 翟文超. 宽波段平场复消色差显微物镜设计[J]. 光子学报, 2023, 52(12):1223002

宽波段平场复消色差显微物镜设计

管鱼龙¹, 郑小兵², 翟文超²

(1 中国科学技术大学 物理学院, 合肥 230026)

(2 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

摘 要: 目前商品化的显微物镜的适用波段范围无法满足 360~1 000 nm 波段范围的相关光子光斑的测量要求。从复消色差基础理论出发, 研究了复消色差玻璃组合的选择方法, 得到了二级光谱校正效果较好的玻璃组合。采用全球面折射式、无穷远校正的结构型式, 设计出一款放大倍率为 20 倍、数值孔径为 0.3、工作距离为 10 mm、齐焦距为 60 mm、视场为 0.66 mm、工作波长范围为 360~1 000 nm 的平场复消色差显微物镜。调制传递函数曲线在 80 lp/mm 处接近衍射极限, 场曲校正满足平场的国际标准, 其余成像指标也接近衍射极限。公差分析结果表明, 该显微物镜满足设计和实际加工要求。

关键词: 光学设计; 显微成像; 显微物镜; 平场复消色差; 宽光谱范围; 相关光子; 装调

中图分类号: TH742

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235212.1223002

0 引言

显微成像技术广泛应用于生物医学^[1]、材料科学^[2]等领域, 显微物镜作为显微成像系统的核心组件, 在不同的应用场合中有不同的设计要求。在光学工程领域, 显微成像测量也是光学装调的重要手段, 较简单的方式是通过星点像判读评估光学系统的成像质量、确定系统成像焦点位置等。随着图像传感技术的发展, 借助图像分析手段可以更精确地评估光学系统的成像质量, 进而指导光学系统的装调, 具有代表性的产品是美国 Optical Perspectives 公司开发的点源显微镜(Point Source Microscope)^[3], 可以实现光路对准和成像质量评估、光学元件的光学参数检测等。

国内外学者针对不同的应用需求, 主要围绕显微物镜的大数值孔径、大视场、长工作距离、宽波段复消色差或高放大倍率等设计难点开展研究。具有代表性的工作有: ROBENS C 等^[4]利用超半球形固体浸没透镜的原理设计了一种数值孔径为 0.92, 工作波长为 852 nm 的大数值孔径显微物镜, 该物镜只需要两个透镜即可在超高真空条件下实现衍射极限成像, 应用于超冷原子实验; 黄木旺等^[5]结合物镜敏感度的指标设计了一种数值孔径为 1.316, 物方视场为 1 mm, 工作波长范围为 532~780 nm 的大数值孔径大视场显微物镜, 该物镜是浸润式物镜, 应用于纳米激光直写加工系统; WANG Weibo 等^[6]基于遮光约束和轴向泰勒级数展开的初始构型设计方法设计了一种数值孔径为 0.13, 工作距离为 525 mm, 工作波长范围为 400~900 nm 的长工作距离宽波段显微物镜, 利用非球面反射式的 Schwarzschild 光学结构实现了长工作距离; 薛金来等^[7]设计了一种数值孔径为 0.75, 物方视场为 1.325 mm, 工作波长范围为 400~760 nm、放大倍率为 20×的大视场宽波段平场复消色差显微物镜, 该物镜通过选用特殊光学材料 CaF₂ 组合其他玻璃材料的方法实现平场复消色差, 解决了普通生物显微物镜的场曲和色差严重的问题; TOYODA M^[8]设计了一种数值孔径为 0.25, 工作波长为 13.5 nm, 放大倍率为 1 500×的高倍率显微物镜, 该物镜通过 Schwarzschild 双反射镜系统和单曲面

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2022YFB3903101), 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(No. YZJJ202201-CX)

第一作者: 管鱼龙, guanyl@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 翟文超, wczhai@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2023-05-19; 录用日期: 2023-07-11

<http://www.photon.ac.cn>

反射镜组合的方法实现高放大倍率和平场消像散,主要应用于极紫外高分辨率显微成像领域。商品化的显微物镜更具通用性,工作波长范围包含有紫外、可见光或者可见光-近红外波段等,实际使用过程中,需要综合考虑具体的应用波段、工作距离以及是否包含盖玻片等因素。

相关光子辐射基准源是一种基于自发参量下转换非线性光学原理的初级辐射标准^[9-10],为了实现相关光子辐射基准源光路系统装调过程中的相关光子成像测量和辅助光路装调^[11-12],需要建立360~1 000 nm的宽波段显微成像测量系统。与文献展示的设计结果以及所调研的商品化显微物镜相比,最主要的设计难点在于所需显微物镜的工作波段范围更宽。本文针对该设计难点,开展了宽波段平场复消色差显微物镜的设计研究。

1 设计指标

显微物镜采用无限远校正的结构形式,配合管透镜和微光相机,构建显微成像测量系统,如图1,微光相机的光敏面与管透镜的焦平面重合。由于商品化管透镜可以满足需求,重点对显微物镜进行设计。显微物镜的工作波段为360~1 000 nm,受限于辅助装调时的仪器结构和观测空间,显微物镜的工作距离不少于10 mm。采用激光泵浦产生的相关光子光斑的尺寸约为10~50 μm ^[11],设计时该显微物镜的物方分辨率至少为50 lp/mm,考虑到显微物镜装调时的星点测量等多用途使用,保留设计余量,要求该物镜在80 lp/mm处调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)曲线接近衍射极限。成像测量使用科学级互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机,其像元尺寸为6.5 $\mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$,像素数为2 048 \times 2 048,相机的截止频率是77 lp/mm,满足显微放大成像的要求。与生物显微镜等不同,该显微成像测量系统是辅助装调仪器,设计时不需要考虑载玻片、溶剂介质等因素。

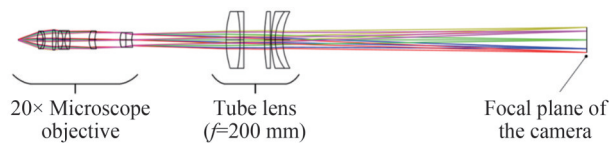


图1 显微成像测量系统

Fig. 1 Microscopic imaging measurement system

所设计的显微物镜放大倍率为20 \times ,物镜焦距为10 mm,数值孔径为0.3,齐焦距为60 mm。根据相机像面尺寸和显微物镜的放大倍率确定显微物镜的物方视场为0.66 mm,畸变小于0.5%。参考ISO显微物镜国际标准19012-2013^[13],显微物镜需要满足平场、复消色差等条件。此外,考虑到系统装调过程中的星点测量等要求,显微物镜还需要满足阿贝正弦条件,成像质量要求接近衍射极限。显微物镜采用反向设计,具体的设计指标如表1所示。

表1 显微物镜设计指标

Table 1 Objective design specifications

Parameters	Specifications
Magnification	20
Numerical aperture	≥ 0.3
Spectral range/nm	360~1 000
Field of view/mm	≥ 0.66
Parfocal length/mm	60
Working distance/mm	≥ 10
Distortion	$\leq 0.5\%$

2 复消色差玻璃材料的选择

宽波段显微物镜的设计首先需要考虑复消色差的问题。反射式显微物镜没有色差影响,但存在中心遮挡或装调困难等问题。折射式显微物镜的复消色差主要通过使用衍射光学元件或不同玻璃材料组合的方

法实现^[14]。不同的方法具有不同的优缺点和适用范围,衍射光学元件的色散程度只与波长有关,通过校正透镜带来的色差实现复消色差,但是衍射光学元件的加工难度较大,不适用于精密光学系统。

选用玻璃组合的方式进行复消色差设计,以密接三片镜为基础模型研究复消色差玻璃组合的选择。通过玻璃组合实现复消色差的理论公式可以表示为^[15]

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^j \varphi_i = 1 \\ \sum_{i=1}^j \varphi_i \frac{1}{\nu_i} = 0, \nu_i = \frac{N(\lambda_0) - 1}{N(\lambda_1) - N(\lambda_2)} (\lambda_1 < \lambda_0 < \lambda_2) \\ \sum_{i=1}^j \varphi_i \frac{P_i}{\nu_i} = 0, P_i = \frac{N(\lambda_1) - N(\lambda_0)}{N(\lambda_1) - N(\lambda_2)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, φ_i 是薄透镜的光焦度, ν_i 是阿贝数, $N(\lambda_i)$ 是折射率, P_i 是部分色散。

玻璃材料选择国产成都光明玻璃库,首先根据波长范围、玻璃生产频次以及价格等指标对玻璃库进行初筛,原始玻璃库共有玻璃304种,初筛后最终剩余25种玻璃。参考复消色差理论公式(1),利用MATLAB软件编写了复消色差玻璃选择程序,选择流程如图2所示。通过玻璃选择程序计算各玻璃组合的光焦度绝对值之和 F_1 、残余色差 F_2 ,并根据这两个指标对玻璃组合进行筛选,优选出合适的玻璃组合。

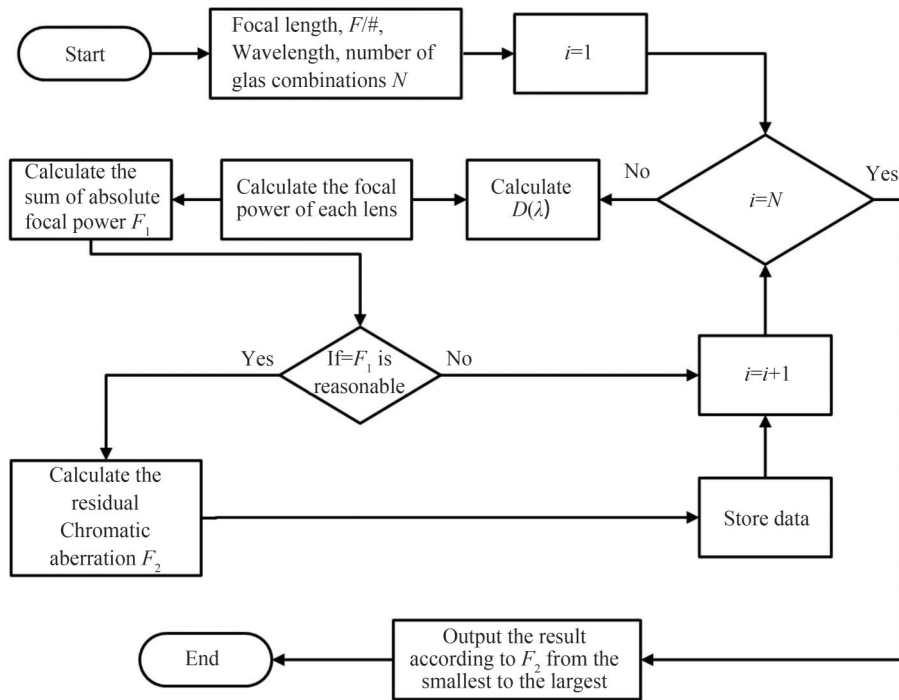


图2 复消色差玻璃选择方法流程

Fig. 2 Flow chart of selection method for apochromatic glass

复消色差玻璃材料选择的计算步骤为:

1)根据式(2)所示的 Sellmeier 1 公式^[16]计算 360~1 000 nm 光谱范围内各波长的折射率。选择 360 nm、400 nm、460 nm、500 nm、560 nm、650 nm、750 nm、850 nm 和 1 000 nm 等 9 个波长作为计算波长,其中 560 nm 作为主波长。

$$N(\lambda)^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3} \quad (2)$$

式中, $N(\lambda)$ 是折射率, $K_1, L_1, K_2, L_2, K_3, L_3$ 是计算系数, λ 是波长。

2)计算各玻璃组合的色散度 $D(\lambda)$, 公式为^[16]

$$D(\lambda) = \frac{N(\lambda) - N(\lambda_0)}{N(\lambda_0) - 1} \quad (3)$$

3)根据式(4)计算玻璃组合的光焦度分配^[16],得到光焦度绝对值之和 F_1 。 F_1 太大不利于初级色差的校正,太小则筛选出的复消色差玻璃组合有限,在本程序中设置 $F_1 < 10$ 。

$$\Phi(\lambda) = \Phi(\lambda_0)[1 + D(\lambda)] \quad (4)$$

式中, $\Phi(\lambda)$ 是密接三片镜在360~1 000 nm光谱范围内各个波长的总光焦度, $\Phi(\lambda_0)$ 是密接三片镜主波长光焦度之和。为满足复消色差条件,需要使各个波长的光焦度相等,将光学系统的总光焦度归一化为1,并引入一个 1×3 的矩阵 E ,结合复消色差条件可得到求解各透镜的最优光焦度分配的矩阵方程,见式(5)~(8)。该矩阵方程没有精确解,使用最小二乘法得到该方程的近似解,获得特定玻璃组合下复消色差效果最优的光焦度分配,见式(9)。最后计算密接三片镜光焦度绝对值之和 F_1 ,当满足 $F_1 < 10$ ^[17],保存该玻璃组合。

$$\begin{cases} \Phi(\lambda_0) = \varphi_1(\lambda_0) + \varphi_2(\lambda_0) + \varphi_3(\lambda_0) \\ \Phi(\lambda) = \Phi(\lambda_0) + \sum_{j=1}^3 \varphi_j(\lambda_0) D_j(\lambda) \\ \Phi(\lambda_1) = \Phi(\lambda_0) + \varphi_1(\lambda_0) D_1(\lambda_1) + \varphi_2(\lambda_0) D_2(\lambda_1) + \varphi_3(\lambda_0) D_3(\lambda_1) \\ \Phi(\lambda_2) = \Phi(\lambda_0) + \varphi_1(\lambda_0) D_1(\lambda_2) + \varphi_2(\lambda_0) D_2(\lambda_2) + \varphi_3(\lambda_0) D_3(\lambda_2) \\ \vdots \\ \Phi(\lambda_n) = \Phi(\lambda_0) + \varphi_1(\lambda_0) D_1(\lambda_n) + \varphi_2(\lambda_0) D_2(\lambda_n) + \varphi_3(\lambda_0) D_3(\lambda_n) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Phi(\lambda_1) = \Phi(\lambda_2) \\ \Phi(\lambda_2) = \Phi(\lambda_3) \\ \vdots \\ \Phi(\lambda_{n-1}) = \Phi(\lambda_n) \\ \Phi(\lambda_n) = \Phi(\lambda_1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \varphi_1(\lambda_0) \cdot (D_1(\lambda_1) - D_1(\lambda_2)) + \varphi_2(\lambda_0) \cdot (D_2(\lambda_1) - D_2(\lambda_2)) + \varphi_3(\lambda_0) \cdot (D_3(\lambda_1) - D_3(\lambda_2)) = 0 \\ \varphi_1(\lambda_0) \cdot (D_1(\lambda_2) - D_1(\lambda_3)) + \varphi_2(\lambda_0) \cdot (D_2(\lambda_2) - D_2(\lambda_3)) + \varphi_3(\lambda_0) \cdot (D_3(\lambda_2) - D_3(\lambda_3)) = 0 \\ \vdots \\ \varphi_1(\lambda_0) \cdot (D_1(\lambda_{n-1}) - D_1(\lambda_n)) + \varphi_2(\lambda_0) \cdot (D_2(\lambda_{n-1}) - D_2(\lambda_n)) + \varphi_3(\lambda_0) \cdot (D_3(\lambda_{n-1}) - D_3(\lambda_n)) = 0 \\ \varphi_1(\lambda_0) \cdot (D_1(\lambda_n) - D_1(\lambda_1)) + \varphi_2(\lambda_0) \cdot (D_2(\lambda_n) - D_2(\lambda_1)) + \varphi_3(\lambda_0) \cdot (D_3(\lambda_n) - D_3(\lambda_1)) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_1(\lambda_1) - D_1(\lambda_2), D_1(\lambda_2) - D_1(\lambda_3) \cdots D_1(\lambda_{n-1}) - D_1(\lambda_n), D_1(\lambda_n) - D_1(\lambda_1) \\ D_2(\lambda_1) - D_2(\lambda_2), D_2(\lambda_2) - D_2(\lambda_3) \cdots D_2(\lambda_{n-1}) - D_2(\lambda_n), D_2(\lambda_n) - D_2(\lambda_1) \\ D_3(\lambda_1) - D_3(\lambda_2), D_3(\lambda_2) - D_3(\lambda_3) \cdots D_3(\lambda_{n-1}) - D_3(\lambda_n), D_3(\lambda_n) - D_3(\lambda_1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} E \cdot \Phi_0 = 1 \\ \begin{bmatrix} E \\ D^T \end{bmatrix} \cdot \Phi_0 = e \\ e = [1, 0, \dots, 0]^T \\ J = \begin{bmatrix} E \\ D^T \end{bmatrix} \\ \Phi = (J^T \cdot J)^{-1} \cdot J^T \cdot e \end{cases} \quad (9)$$

式中, Φ_0 是理论上的最优光焦度分配矩阵, D 是色散度矩阵, Φ 是最小二乘法得到的最优光焦度分配矩阵。

4)对 F_1 分配合理的玻璃组合计算最小残余色差 F_2 ,比较二分之一焦深与 F_2 和焦距的乘积,如果乘积小于二分之一焦深,则说明该玻璃组合具有较好的复消色差效果^[16],将其保存在数据库中,最后输出所有满足要求的玻璃组合。 F_2 和焦深 ϵ 的计算公式为

$$\begin{cases} F_2 = D^T \cdot \Phi \\ \epsilon = 4\lambda (F/\#)^2 \end{cases} \quad (10)$$

根据上述流程,获得的复消色差玻璃组合见表2。根据式(10)计算得到显微物镜的焦深为 $6.22\ \mu\text{m}$,玻璃组合H-FK95N、H-LaF50B和H-LaF52的最小残余色差和焦距的乘积为 $0.086\ \mu\text{m}$,远小于二分之一焦深。此外,该玻璃组合的光焦度分配也比较合理,有助于光学系统的设计和优化,因此选择该玻璃组合进行后续设计。

表2 复消色差玻璃组合的参数
Table 2 Parameters of apochromatic glass assemblage

Glass1	Glass2	Glass3	Φ_1	Φ_2	Φ_3	F_1	$F_2/(\times 10^{-5}\ \text{mm})$
H-FK95N	H-LaF50B	H-LaF52	1.838	-3.412	2.574	7.823	8.56
H-FK95N	H-LaF52	H-LaF53	2.614	-3.854	2.240	8.708	10.36
H-FK61	H-LaK2A	H-LaF52	3.990	1.373	-4.363	9.726	11.00
H-FK95N	H-LaK53B	H-ZBaF50	2.316	1.295	-2.610	6.221	13.29
H-FK95N	H-ZK11	H-ZK21	-4.331	2.895	2.436	9.661	13.36
H-FK95N	H-LaK53B	H-LaF52	2.636	-2.627	0.991	6.254	13.90
H-FK95N	H-ZK21	H-ZBaF50	2.951	-2.950	0.999	6.900	14.59

3 光学设计过程

3.1 初始结构选择

初始结构的选型参考专利《显微物镜以及自动光学检测系统》^[18]。专利中的显微物镜结构如图3所示,配套200 mm管透镜可实现 $50\times$ 放大,数值孔径为0.42,工作距离为20.5 mm,齐焦距为95 mm,工作波段为可见光波段。

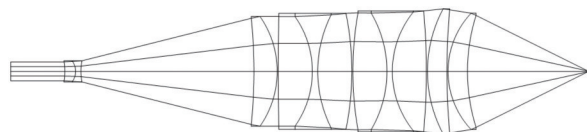


图3 专利中显微物镜结构

Fig. 3 Microscopic objective structure in the patent

设计的显微物镜配套200 mm管透镜实现 $20\times$ 放大,数值孔径 $\text{NA}=0.3$,工作距离为10 mm,齐焦距为60 mm。在参考专利的基础上进行焦距缩放,删除其中一个三胶合透镜以减少齐焦距,通过ZEMAX软件初步优化后得到的初始结构如图4所示。



图4 显微物镜初始结构

Fig. 4 Initial structure of microscopic objective

3.2 优化过程

在初始结构的基础上使用H-FK95N、H-LaF50B和H-LaF52玻璃材料替换专利中的玻璃材料,将视场设置为0.66 mm,逐渐扩大显微物镜的工作波长范围,得到符合设计要求的显微物镜光学结构。考虑到透镜的加工制造和透过率等要求,优化时限制光学系统中玻璃的最小边缘厚度为1 mm,最大中心厚度为4 mm,最小中心厚度为1 mm。考虑到透镜的装配过程,限制透镜之间的最小中心空气间隔为1 mm,透镜边缘空气间隔是2 mm。为了降低透镜元件的公差敏感性,使用RAID和RAED等操作数限制光线在各透镜之间的偏折角度^[19]。优化得到由8片透镜组成,工作距离为10 mm,总长度为59.98 mm的显微物镜。镜头光学结构由一个双胶合透镜、一个三胶合透镜和三个单片镜组成,其中第1和第5片透镜使用H-LaF50B玻璃,第2和第7片透镜使用H-LaF52玻璃,其余透镜采用H-FK95N玻璃,如图5所示。

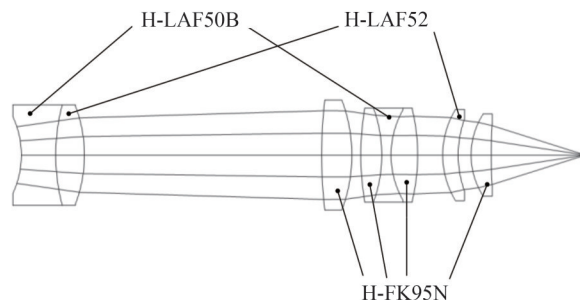


图5 显微物镜结构

Fig. 5 Structure of microscopic objective

3.3 CaF_2 玻璃替换

由于特殊色散光学材料 CaF_2 是复消色差设计的常用材料^[7],尝试将H-FK95N玻璃更换为 CaF_2 ,比较设计效果。三胶合透镜担负着主要的像差校正功能,首先将三胶合透镜结构中H-FK95N玻璃更换为 CaF_2 ,其余透镜玻璃材料不变,对系统进行优化。通过对比发现,更换 CaF_2 后的光学系统整体成像质量变好,但是色焦移变大,结果如图6所示。

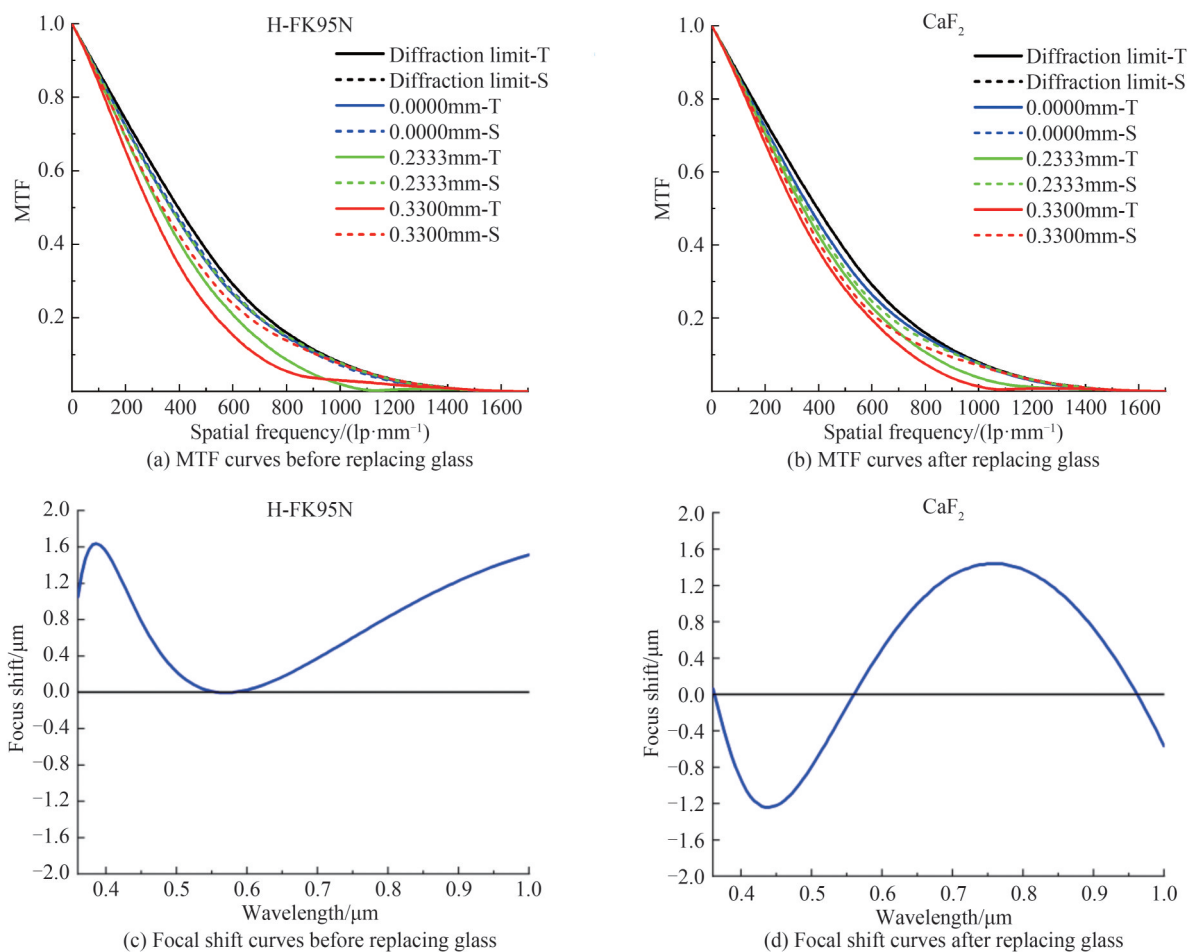


图6 替换玻璃前后的像质对比

Fig. 6 Image quality comparison before and after replacing glass

继续将所有的H-FK95N玻璃更换为 CaF_2 ,成像质量几乎保持不变,但色焦移明显变大,最终仅替换了三胶合透镜中的H-FK95N玻璃。更换玻璃材料前后光学系统的色焦移均小于二分之一焦深(3.11 μm),说明通过复消色差玻璃选择程序计算得到的玻璃组合具有良好的复消色差效果。考虑到部分透镜使用 CaF_2 材料后成像质量进一步改善,将三胶合透镜中的H-FK95N玻璃替换为 CaF_2 后的光学结构如图7所示。

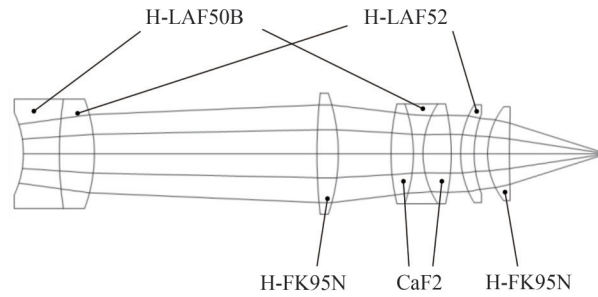


图7 显微物镜最终结构

Fig. 7 Final structure of microscopic objective

图7中的第7片和第8片透镜整体具有正光焦度,主要功能是在不引入大量球差的基础上,实现较大的物方数值孔径;三胶合透镜整体具有负光焦度,主要功能是像差的校正,特别是二级光谱、彗差和与视场有关的垂轴像差的校正,但是三胶合透镜会引入负的匹兹瓦场曲;第三片透镜具有正光焦度,主要功能是实现光线的偏折收集,同时尽量减小色差的引入;双胶合透镜整体具有负光焦度,主要功能是校正残余场曲和残余轴向色差等残余像差。

为保证较高的透过率,设计时均使玻璃厚度小于4 mm。通过查阅玻璃生产厂商的资料,在360~1 000 nm的宽波段范围内,CaF₂和H-FK95N在全波段均具有较高的透过率,H-LaF50B和H-LaF52在360~400 nm波段透过率略低。根据朗伯-比尔定律和镜头中的透镜厚度,估算了该显微物镜的材料吸收损失。透镜表面镀减反膜后的反射率小于1.5%,估算得到该镜头镀膜后的总透过率在360~400 nm波段大于0.67,400~1 000 nm波段大于0.8。

3.4 结果分析

通过对该显微物镜的MTF曲线、色焦移图、轴向球差图、场曲和畸变图、垂轴像差图、均方根(Root Mean Square, RMS)波前图和衍射能量分布图等指标进行分析,结果显示该系统在光学设计上的成像质量接近衍射极限,可以达到初始设计指标。

所设计物镜的艾里斑半径是1.138 μm,根据瑞利判据计算得到分辨率为1.138 μm,该系统的截止频率为440 lp/mm,通过图6可以得到该光学系统MTF曲线在440 lp/mm处仍然大于0.3。图8是该镜头在80 lp/mm处的MTF曲线,可以看出在80 lp/mm处各视场的子午和弧矢MTF曲线均接近衍射极限,边缘视场的MTF值也大于0.88,满足设计要求。

显微物镜的轴向球差曲线如图9所示,轴向球差小于焦深^[20]。从图6也可看出,该镜头的色焦移最大变化量为1.44 μm,小于二分之一焦深,说明二级光谱校正效果满足要求。

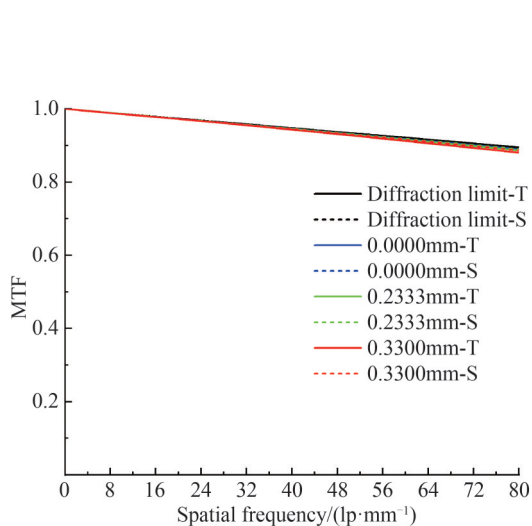


图8 MTF曲线

Fig. 8 MTF curves

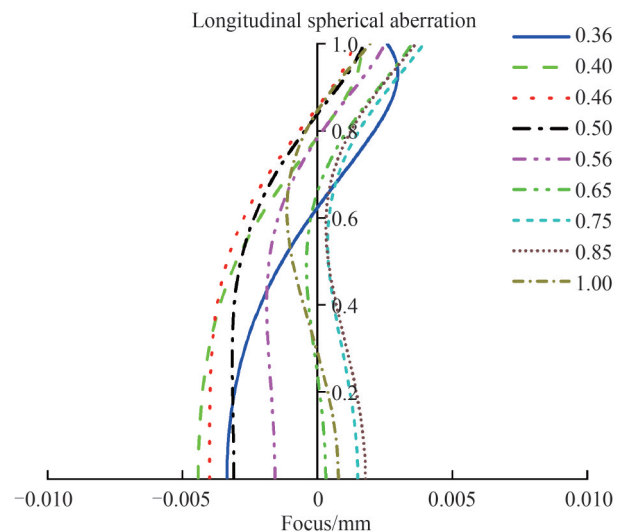


图9 轴向球差曲线

Fig. 9 Longitudinal spherical aberration curves

根据阿贝正弦条件,当球差和彗差校正完全后,物镜的第二主平面将是以前焦点为圆心,以焦距为半径的圆^[21]。无穷远校正显微物镜的阿贝正弦条件为^[21]

$$h = f \sin U \quad (11)$$

式中, h 是主平面上光线高度, f 是焦距, U 是孔径角。

通过追迹物镜第二主平面上各波长对应的光线高度和数值孔径,利用式(11)计算不同波长的焦距,结果表明不同波长的焦点相对于主波长焦点的变化均小于焦深,见表3,该结果也与图6所示的色焦移图一致,表明该显微物镜满足阿贝正弦条件。

表3 阿贝正弦条件计算结果
Table 3 Results of Abbe sine condition calculation

Wavelength/nm	h/mm	$\sin U$	f/mm	f_0/mm	Difference value/ μm
360	3.006 4	0.300 6	10.002 4	10	2.43
400	3.005 8	0.300 5	10.001 5	10	1.50
460	3.004 7	0.300 4	10.001 3	10	1.27
500	3.004 2	0.300 4	10.001 6	10	1.64
560	3.003 5	0.300 3	10.002 4	10	2.39
650	3.002 7	0.300 2	10.003 3	10	3.35
750	3.002 0	0.300 1	10.003 8	10	3.77
850	3.001 2	0.300 0	10.003 5	10	3.49
1000	3.000 0	0.299 9	10.001 9	10	1.87

图10是该镜头的场曲和畸变曲线,可以看出全视场的最大相对畸变为0.254%,小于设计指标0.5%,满足设计要求。

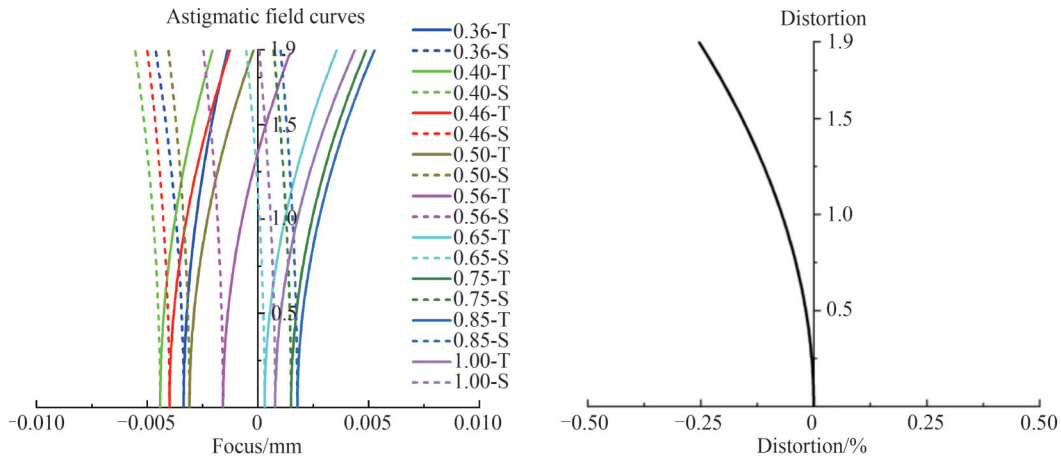


图10 场曲和畸变曲线
Fig. 10 Astigmatic field curves and distortion curves

根据ISO显微物镜国际标准^[13],平场数的计算公式和显微物镜的平场条件分别为

$$\Delta = \frac{\tau_t + \tau_s}{2} \quad (12)$$

$$\begin{cases} |\Delta| \leq \delta \\ |\tau_t - \tau_s| \leq \delta \end{cases} \quad (13)$$

式中, τ_t 和 τ_s 分别是指沿着光轴方向,边缘视场的子午像面和弧矢像面到近轴像面的距离, δ 是国际标准中定义的焦深,由Berek公式表示为^[22]

$$\delta = \frac{\omega}{M} \cdot \frac{25000}{NA} + \frac{\lambda}{2NA^2} \quad (14)$$

式中, ω 是人眼的分辨力,取0.0014 rad, M 是显微物镜可实现的放大倍率, NA 是数值孔径, λ 是主波长。计算得到标准定义的焦深 δ 为8.94 μm ,大于式(10)所定义的焦深 ϵ ,因此文中使用更严格的6.22 μm 表示焦深。主波长对应的 τ_1 和 τ_2 分别是3.08 μm 和-0.89 μm ,计算得到的平场数和像散均小于焦深,因此该显微物镜也满足平场条件。

图11是所设计显微物镜的像差曲线,可以看出在整个视场范围内的垂轴像差小于2 μm ,垂轴像差的校正效果较好。RMS波前曲线如图12所示,边缘视场的RMS波前差最大约为0.086 λ ,边缘视场的RMS波前差均值为0.0496 λ ,也基本接近衍射极限,满足设计指标。图13是该镜头的衍射能量分布图,可以看出90%的能量集中在半径为2.3 μm 的包围能量圈中,能量集中度高,且边缘视场点列图中的RMS半径是0.572 μm ,小于艾里斑半径。综上所述,该镜头的各项指标分析均表明设计结果满足指标要求。

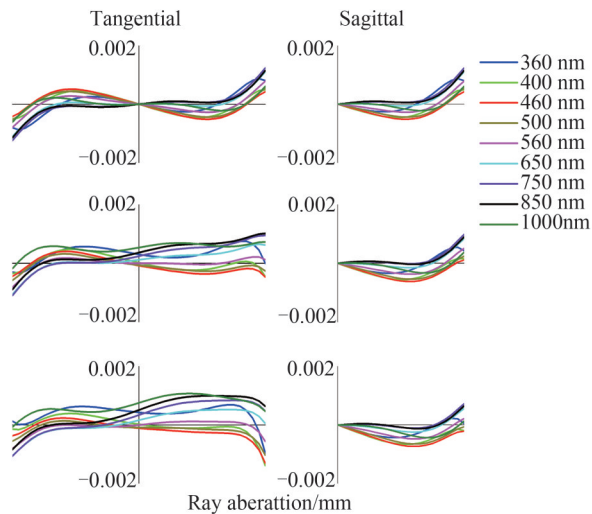


图11 像差曲线

Fig. 11 Ray aberration curves

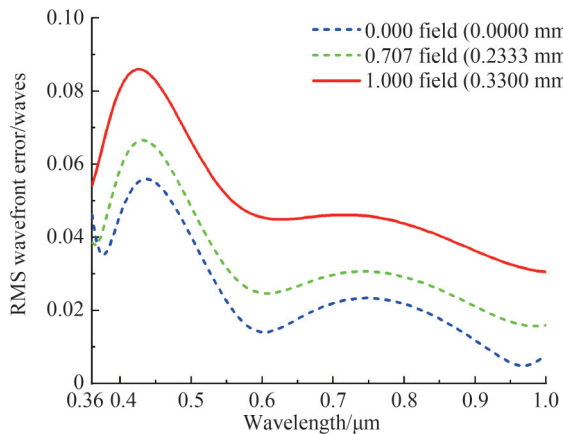


图12 RMS波前

Fig. 12 RMS wavefront error curves

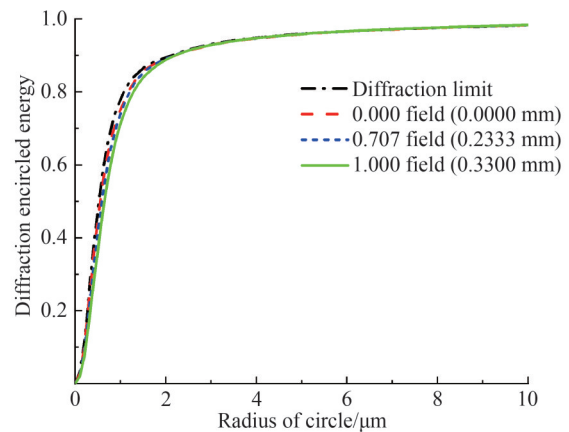


图13 衍射能量分布

Fig. 13 Diffraction encircled energy distribution curves

3.5 公差分析

光学系统的公差主要包括元件公差、材料公差和装配公差三大类。合理的公差分配可以在保证光学系统成像质量的前提下,降低对透镜加工制造和装配的要求,从而降低成本^[7]。显微物镜属于精密光学系统,对于成像质量的要求较高,需要分配比较严格的公差,结合ZEMAX中灵敏度分析结果,系统的公差分配如表4所示。

选用80 lp/mm处的衍射MTF平均值作为评价指标,通过蒙特卡洛分析后得到的公差分析结果如表5所示。在80 lp/mm处MTF名义值为0.8879,有80%可能大于0.8391,可以满足显微物镜的成像质量要求和加工制造要求。

表4 公差分配
Table 4 Tolerance distribution

Items	Value
Fringe power/ λ	2
Surface irregularity/ λ	0.2
Central thickness/mm	± 0.02
Airspace/mm	± 0.02
Tilt/ $^{\circ}$	± 0.01
Decenter/mm	± 0.01
Refractive index	± 0.001
Abbe-number	$\pm 0.5\%$

表5 蒙特卡洛分析结果
Table 5 Monte Carlo analysis results

Percent	Value
98%	0.798 7
90%	0.825 8
80%	0.839 1
50%	0.859 7

4 结论

针对相关光子辐射基准光路装调中相关光子传输特性测量的特殊需求,设计了一款宽波段平场复消色差的显微物镜,对所设计显微物镜的各种像差进行了详细比较评估,结果均满足设计指标要求。从复消色差基础理论出发,以密接三片镜为基础模型,提供了复消色差玻璃材料选择的方法和详细流程,所获得的H-FK95N、H-LaF50B和H-LaF52玻璃组合在360~1 000 nm波段范围内具有良好的复消色差效果,通过合理地使用CaF₂材料可以进一步提升镜头的成像质量,所展示的方法和流程在宽波段平场复消色差显微物镜的设计中具有一定的参考价值。在后续的工作中,将利用该显微物镜和管透镜,配合高灵敏度相机构建相关光子显微成像测量系统,解决新体制辐射基准工程化研制中的光机装调工艺难题。

参考文献

- [1] AN Sha. Axial plane optical microscopy and applications[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
安莎. 轴平面光学显微成像技术及其应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [2] ZHANG Yueqian, GROSS H. Systematic design of microscope objectives. Part I: System review and analysis [J]. Advanced Optical Technologies, 2019, 8(5):313-347.
- [3] ROBERT P, WILLIAM K. Optical alignment using the point source microscope [C]. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5877:5877081.
- [4] ROBENS C, BRAKHANE S, ALT W, et al. High numerical aperture (NA=0.92) objective lens for imaging and addressing of cold atoms [J]. Optics Letters, 2017, 42(6):1043-1046.
- [5] HUANG Muwang, LIU Xu, LIN Faguan. Design of large field of view & high NA microscope objective [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5):227-231.
黄木旺, 刘旭, 林法官. 大视场大数值孔径显微物镜光学设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5):227-231.
- [6] WANG Weibo, WANG Chao, LIU Jianet al. Wide-spectrum microscope with a long working distance aspherical objective based on obscuration constraint [J]. Sensors, 2016, 16(11):1886.
- [7] XUE Jinlai, GONG Yan, LI Dianmeng. Optical design of the N.A. 0.75 plan-apochromatic microscope objective [J]. Chinese Optics, 2015, 8(6):957-963.
薛金来, 巩岩, 李佃蒙. N.A. 0.75平场复消色差显微物镜光学设计 [J]. 中国光学, 2015, 8(6):957-963.
- [8] TOYODA M. Flat-field anastigmatic mirror objective for high-magnification extreme ultraviolet microscopy [J]. Advanced Optical Technologies, 2015, 4(4):339-346.
- [9] LEMIEUX S, GIESE E, FICKLER R, et al. A primary radiation standard based on quantum nonlinear optics [J]. Nature Physics, 2019, 15:529-532.
- [10] MIGDALL A L, DATLA R U, SERGIENKO A, et al. Absolute detector quantum-efficiency measurements using

- correlated photons[J]. *Metrologia*, 2003, 32:479-483.
- [11] HU Youbo, GAO Dongyang, LI Jianjun, et al. Accuracy analysis for coincidence measurement of entangled photons calibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6): 0630001.
胡友勃,高冬阳,李健军,等.基于自发参量下转换定标辐射计的实验研究[J].*光子学报*, 2020, 49(6): 0630001.
- [12] ZHENG Xiaobing, XIA Maopeng, ZHAI Wenchao, et al. SI traceable solar spectral irradiance measurement based on a quantum benchmark: a prototype design[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 1454.
- [13] International standard ISO 19012-2013, *Microscopes—designation of microscope objectives* [S]. 2013
- [14] YU Xiaohui. Design of flat-apochromatic microscope objective with broad spectrum and large numerical aperture [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
郁晓晖.宽光谱大数值孔径平场复消色差物镜设计[D].南京:南京理工大学, 2018.
- [15] KINGSLAKE R, JOHNSON R B. *Lens design fundamentals* [M]. YU Kan, LIU Xiangbiao, transl. 2th ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2021: 129.
金斯莱克.鲁道夫, 约翰逊. R.巴里.透镜设计基础[M].俞侃, 刘祥彪, 译. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2021: 129.
- [16] GUO Baoze, SHI Entao, WANG Yongmei, et al. Glass selection and optimization of coaxial PGP spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2):149-154.
郭宝泽, 石恩涛, 王咏梅, 等. 共轴 PGP 型光谱仪的玻璃选择与优化[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 149-154.
- [17] DE ALBUQUERQUE B F, SASIAN J, DE SOUSA F L, et al. Method of glass selection for color correction in optical system design[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13):13592-13611.
- [18] GAO Jianxiang. Microscopic objective and automatic optical inspection system: CN111239996A[P]. 2020.
高建翔.显微物镜以及自动光学检测系统: CN111239996A[P]. 2020.
- [19] 李士贤, 李林. *光学设计手册* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [20] ZHANG Yueqian, GROSS H. Systematic design of microscope objectives. Part II: lens modules and design principles[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2019, 8(5):349-384.
- [21] YUAN Xiaowen, WANG Ji, CHEN Changqing, et al. Measurement of iso frequency curves and band structure based on the Abbe sine condition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 135-140.
袁小文, 王玘, 陈长清, 等. 基于阿贝正弦条件的光子等频图和能带结构测试系统[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 135-140.
- [22] ZHOU Enyuan, LIU Lihui, LIU Yan, et al. Design of high NA flat-field microscope objective for near infrared [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7):188-194.
周恩源, 刘丽辉, 刘岩, 等. 近红外大数值孔径平场显微物镜设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 188-194.

Lens Design of the Broadband Plan-apochromatic Microscope Objective

GUAN Yulong¹, ZHENG Xiaobing², ZHAI Wenchao²

(1 *School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(2 *Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: In the field of optical engineering, microscopic imaging measurement is an important means of optical installation and adjustment. To realize correlated photon imaging measurement and auxiliary monitoring in the process of correlated photon radiation reference source optical path system installation and adjustment, it is necessary to establish a microscopic imaging system with a broad spectrum spanning of 360~1 000 nm. Some scholars at home and abroad have designed a series of finite conjugate or infinite corrected objective lenses with high numerical aperture, large field of view, broad spectrum coverage, high magnification, et al. There are also a variety of commercial microscopic objective lenses, but the correlated photons band to be measured is beyond the applicable band range of current commercial microscopic objective lenses. A broadband plan-apochromatic microscope objective was designed in this study. The design of broadband microscope objective needs to consider the problem of apochromatism firstly. The apochromatism of refractive microscope objective is mainly realized by the diffractive optical elements or the combination of different glass materials, the diffractive optical elements are not suitable for precision optical systems, so the glass combination method is used for the design of apochromatic microscope objective. Based on the basic apochromatic theory, the model of compact three-piece lenses was selected, then was realized through a program script with MATLAB® software. The glass material chooses

domestic CDGM glass library. Firstly, according to the range of wavelength, glass production frequency, price, and other indicators of the glass library for initial screening, the original glass library has a total of 304 kinds of glass, the final remaining 25 kinds of glass after the initial screening. Then, the least square method is used to calculate the optimal focal power allocation of each glass combination, and the glass combination is selected by the sum of the absolute focal power and the corresponding minimum residual chromatic aberration. In the end, the glass combination with better secondary spectral correction effect is obtained. In addition, the influence of a commonly used special optical material, CaF_2 , on secondary spectral correction was also studied. It is found that the introduction of CaF_2 will improve the total imaging quality. Although the color focal shift will be larger, the color focal shift can still meet the requirements. Finally, the combination of CaF_2 , H-FK95N, H-LaF50B and H-LaF52 glasses was selected. By selecting an existing patent as the initial structure, an infinite-corrected and plan-apochromatic microscope objective and broad spectrum coverage with magnification of $20\times$, numerical aperture of 0.3, working distance of 10 mm, parfocal length of 60 mm, field of view of 0.66 mm and spectrum coverage of 360~1 000 nm was designed, without any aspheric sphere. The MTF curve, color focal shift, ray aberration, astigmatic field curves and distortion curves, longitudinal spherical aberration, RMS wavefront error and diffraction encircled energy distribution diagrams of the optical system were analyzed. The results showed that the MTF curve of the system was close to the diffraction limit at 80 lp/mm, the astigmatic field correction meet the international standard of flat field, and the other imaging indicators were also close to the diffraction limit. By sensitivity analysis in ZEMAX® software, the element tolerance, material tolerance and assembly tolerance of the microscope objective are reasonably allocated. The geometric MTF value at 80 lp/mm was selected as the evaluation indicator. After Monte Carlo analysis, the nominal MTF value of the microscope objective at 80 lp/mm was 0.887 9. In fact, there is an 80% probability that the MTF exceeds the value of 0.839 1, which means that the microscope objective can meet the requirements of image quality and manufacture. The design in this paper can provide technical reference for the design of the plan-apochromatic microscope objective, especially for the broadband apochromatic design.

Key words: Optical design; Microscopic imaging; Microscope objective; Plan-apochromatic; Broadband apochromatic; Correlated photons; Adjustment

OCIS Codes: 230.3990; 220.3620; 220.3630