

文章编号 1004-924X(2024)18-2744-08

近红外二区宽谱段光学成像系统设计

姜 洋^{1*}, 赵东旭², 宋玺尧^{1,3}, 顾奕琦⁴, 邢 妍¹, 郑 博⁵

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 佛山大学 物理与光电工程学院 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东 佛山 528000;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 吉林大学中日联谊医院, 吉林 长春 130033;
5. 广东科学技术职业学院, 广东 珠海 519090)

摘要: 针对近红外二区活体小动物荧光成像需求, 解决宽谱段内多种波长同时复用问题, 研究成像镜组的光学设计方法。以像差校正为设计出发点通过像差曲线的判读逐步迭代镜组结构; 通过合理的光焦度分配加大后工作距离; 通过玻璃材料选择优化兼顾宽谱段色差控制与能量透过率。最终获得光学系统焦距为 40mm 的光学结构, 在工作距离范围内 (200~600 mm), 近红外二区波段 (0.9~2.3 μm) 均可保证 $\text{MTF} > 0.6@34 \text{ lp/mm}$, RMS 点斑尺寸小于像元尺寸 15 μm , 全视场畸变小于 1%。经分辨率靶标实拍测试能够达到 50 μm 的分辨能力。该光学设计方案提供了一种全玻璃球面透镜的解决方案, 可以满足低探测阈值高质量活体小动物荧光成像需求。

关键词: 近红外二区活体成像; 光学设计; 像差曲线; 焦外散斑

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243218.2744

Design of NIR-II imaging system with wide spectrum

JIANG Yang^{1*}, ZHAO Dongxu², SONG Xiyao^{1,3}, GU Yiqi⁴, XING Yan¹, ZHENG Bo⁵

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Intelligent Micro-Nano Optoelectronic College of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. China-Japan Union Hospital of Jilin University, Changchun 130033, China;
5. Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Zhuhai 519090, China)

* Corresponding author, E-mail: le_zhi@yeah.net

Abstract: To address the demand for in vivo small animal fluorescence imaging in the near-infrared II (NIR-II) window, as well as solve the problem of simultaneous reuse of multiple wavelengths within a wide spectral range. This study took the perspective of aberration correction and designed an optical system by iteratively refining the lens group structure based on aberration curves. The working distance was

收稿日期: 2024-04-28; 修订日期: 2024-06-18.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20220201095GX); 天津市科技计划项目 (No. 22YFYSHZ00040); 国家自然科学基金项目 (No. 62105326); 广东省普通高校青年创新人才项目 (No. 2022KQNCX190)

increased through reasonable focal length distribution, and the glass material selection was optimized to balance chromatic aberration control and energy transmittance within the wide spectral range. The final optical structure ended up with a focal length of 40 mm, capable of ensuring $MTF > 0.6@34 \text{ lp/mm}$ for the NIR-II spectral band ($0.9 \sim 2.3 \mu\text{m}$) within the working distance range ($200 \sim 600 \text{ mm}$), with RMS spot size smaller than the pixel size ($15 \mu\text{m}$) and distortion less than 1% across the entire field of view. Real-shot tests with resolution targets demonstrate a resolution capability of $50 \mu\text{m}$. This optical design provides a solution based on all-glass spherical lenses capable of meeting the requirements for high-quality, low detection threshold in vivo small animal fluorescence imaging in the NIR-II window.

Key words: NIR-II vivo imaging; optical design; aberration curves; bokeh

1 引 言

近红外二区谱段为 $1\ 000 \sim 2\ 300 \text{ nm}$ 的光学窗口^[1],在此波段内生物体自发荧光水平较低、组织散射及吸收能量较少适合用来对深层组织荧光成像。光学成像相对于 CT/MRI 成像具有更高的分辨率和更短的时间反馈^[2],结合荧光染料、纳米生物探针、基因改造等技术,可以用于实时观察活体小动物的体液循环、药物运输与富集过程、肿瘤组织扩散等实验场景,作为一种原位、非侵入的观测模式为生物工程研究开拓了新的技术途径^[3-6]。

2009 年斯坦福大学的戴宏杰团队最早提出原位近红外二区光学窗口的实验概念^[7],随后于 2011 年搭建了基于液氮制冷 InGaAs 相机的荧光成像实验系统^[8],并在 2014 年利用纳米探针技术实现了活体小鼠大脑血流状况监测^[9];2013 年,苏州纳米所王强斌课题组完成商业化设备研发,推出国内外第一款基于近红外二区荧光(NIR-II, $900 \sim 1\ 700 \text{ nm}$)的小动物活体影像系统(Series III 900/1 700),同课题组在 2018 年搭建可见光与近红外双光路成像系统^[10];国内外陆续出现的近红外二区活体小动物成像系统普遍缺乏专用的光学设计解决方案,所使用的工业镜头缺乏针对窄带滤光片的像差校正考虑,最小工作距离通常在 30 cm 以上限制了系统的集光能力^[11-13],信噪比与成像质量还有很大的提升空间^[14,16]。

本文从系统初始结构建立到基于像差理论对镜组复杂优化,兼顾景深范围内与背景焦外成像效果;在优化过程中通过对像差曲线的判读分析指导优化方向;通过光路中的窄带滤光片规避

自体荧光信号与照射光源干扰;利用多重组态优化保证各工作距离、工作谱段内的像差校正。通过镜头设计、加工及系统搭建验证了光学成像质量。对近红外二区谱段相关应用研究提供了高品质的专用光学成像解决方案。

2 光学设计思想

2.1 系统结构优化流程

在生物荧光成像应用中光源激发出的荧光能量较弱,必须通过特定谱段窄带滤光片滤除背景杂光信号干扰。窄带滤光片的膜层一般针对特定入射光线角度设计,如果入射角度存在偏差,则中心波长将出现漂移最终影响信噪比。在光学设计中需将滤光片置于镜组与探测器之间,控制各个视场主光线垂直入射于像面;同时通过前端镜组补偿滤光片所引入的像差。为保证能量透过率与成像质量,采用定焦光学系统。通常实验用幼鼠身长一般在 10 cm 以内,根据不同生长阶段的观察需求,物方视场尺寸通过改变工作距离调节。根据物像关系综合考量设定焦距为 40 mm,在保证能量收集效率的同时兼顾景深, $F/\#$ 设定为 2。首先根据物像关系确定焦距、视场等初级光学参数,考虑到镜组和探测器间要插入滤光片切换装置需留有足够的空间,所以初始结构按照反摄远物镜结构设计,即前组 A 为负光焦度镜组,后组 B 光焦度为正,如表 1 所示。考虑到像面照度均匀性、探测器主光线入射角限制与滤光片入射角度要求,光路设定为像方远心光路,由此确定光阑位置位于后组前焦面。光阑置于镜组中间能够增加结构对称性减小垂轴像差。依据计算获得初始结

构合理分配光焦度,使用无像差的理想透镜设定无限远物距建模,如图 1 所示。

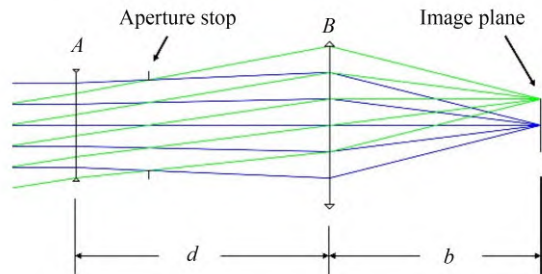


图 1 理想透镜的初始结构

Fig. 1 Schematic layout of perfect lens

表 1 系统指标参数

Tab. 1 Specifications of optical system

Index	Parameters
Working spectrum/ μm	0.9~2.3
Resolution	640×512
Detector pixels/ μm	15
F number	2
Focal length/mm	40
Focus range/mm	100~+ ∞
BFL/mm	>50

$$f_A = \frac{df}{f-b}, f_B = \frac{db}{d+b-f}, \quad (1)$$

其中: f 为焦距, d 为前后组间隔, b 为后截距。

在初始结构的基础上,使用成都光明玻璃材料 H-K9L 建模,根据无限远单透镜最佳面型(最小球差^[16]公式)获得实际透镜的初始结构如图 2 所示。

$$R_1 = \left[\frac{2(n+2)(n-1)}{n(2n+1)} \right] f, \\ R_2 = \frac{(n-1)[2(n+2)f - (2n+1)t]}{[n(2n+1) - 2(n+2)]}, \quad (2)$$

其中: R_1 为透镜前表面曲率半径 R_2 为后表面曲率半径, n 为透镜材料折射率, t 为透镜厚度。

光线光扇图所表征的像差曲线形态为各种像差共同作用的结果,可以从曲线的形状和趋势判定当前结构的残余像差情况,进一步指导平衡像差的优化策略。光扇图的横轴 P_x, P_y 表示归一化的光瞳坐标,纵轴 E_x, E_y 表示实际光线在像面

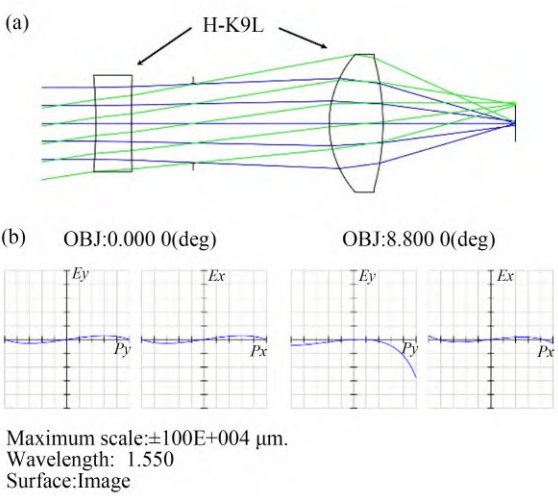


图 2 实际透镜的初始结构(a) & 光线光扇图(b)

Fig. 2 Initial configuration with real lens (a) & Transverse ray fan plot (b)

处与主光线的偏差。从图 2(b)中可知边缘视场曲线弯曲明显,表明彗差较大^[17]。

近红外二区波段横跨 1 000~2 300 nm,在 1 300 nm 宽度的谱段内需要对镜头进行消色差设计。材料阿贝数与镜组光焦度的分配都是影响色差的因素。在后组中远离光阑的位置加入双胶合透镜补偿前方镜组产生的色差,胶合面离轴光束的不对称性可以控制彗差等轴外像差,如图 3(a)。双胶合透镜由低色散的正透镜和高色散的负透镜组成,材料的阿贝数 V 相差越大色差校正效果越好。系统总光焦度为正,前组选择折射率较小的材料起到像差补偿作用,后组要承担光线的汇聚偏折光焦度为正,在后续的优化中以此原则来调整光焦度的分配^[18-20]。从图中可以看出,像差曲线呈现出球差(S 形)与彗差(U 形)残留。

像差曲线为多种像差共同的作用,并且相互影响。由图 3(b)可见原点处曲线的斜率不为零表明存在残余场曲,若 x, y 斜率不同则表明存在像散。各波长曲线垂轴向分离的大表明存在残余垂轴色差。在优化过程中可以通过改变透镜形状、调整焦面位置(曲线旋转)和光阑移动(曲线平移),使得光线偏差的动态范围最小。继续将工作调整为近红外二区波段,通过增加或分裂镜片继续优化。后组通过增加正透镜来分担胶合镜的光焦度;与可见光波段相比

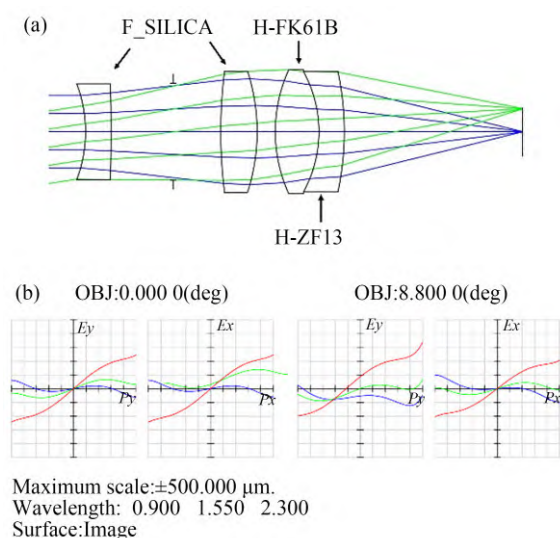


图 3 复杂化的初始结构(a)及光线光扇图(b)

Fig. 3 Initial configuration with cemented doublet (a) & Transverse ray fan plot (b)

常规玻璃材料在近红外波段的折射率更小容易造成较大曲率的面型出现,必须合理分配光焦度、分裂像差大的透镜,控制主光线在各面的入射角度平滑光线束以及调整光阑位置以减小像差。

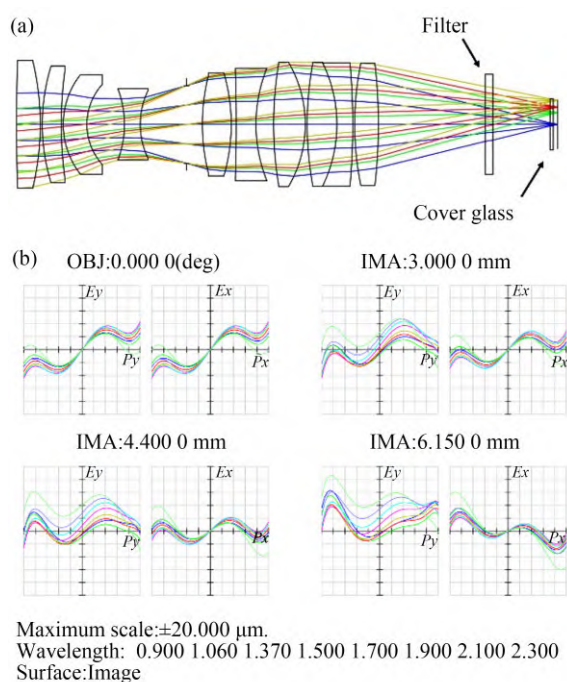


图 4 光学系统结构(a)及光线光扇图(b)

Fig. 4 Layout of optical structure (a) & Layout ray fan plot (b)

最终设计仅使用三种材料完成,分别为低折射率的熔融石英玻璃、高折射率高色散重火石玻璃 H-ZF13 和低折射率低色散氟冕玻璃 H-FK61B。其中 H-ZF13 和 H-FK61B 组成胶合镜。透镜组只有胶合镜中使用折射率较高的 H-ZF13 避免产生严格的公差^[21-26]。考虑到加工成本、热稳定性与加工难度,镜片全部采用球面玻璃透镜设计,尽量使用对称或平凸(或平凹)面型。

针对不同具体应用,波长选择通过置于镜组与探测器间的滤光片转轮实现。通过滤光片转轮切换兴趣光谱通道。窄带滤光片为厚度 2 mm 的熔融石英平行平板。对于不同工作距离产生的离焦像差,通过镜组整体调焦的方式校正,调焦行程约为 11 mm。

2.2 焦外成像的优化考量

在传统生物成像光学设计中主要关注焦面处的成像质量,像差校正优先考量的是与像面共轭物方的图像对比度。荧光成像需要收集尽可能多的能量,所以通常需要大相对孔径(小 F/#),因此产生较小的景深(清晰成像范围)。景深=远景距离-近景距离。

近景距离:

$$Z_N = \frac{f(z' + \delta z/2)}{f - (z' + \delta z/2)} \quad (3)$$

远景距离:

$$Z_F = \frac{f(z' - \delta z/2)}{f - (z' - \delta z/2)} \quad (4)$$

焦深:

$$\delta z' = 2b(F/\#)(1 - m), \quad (5)$$

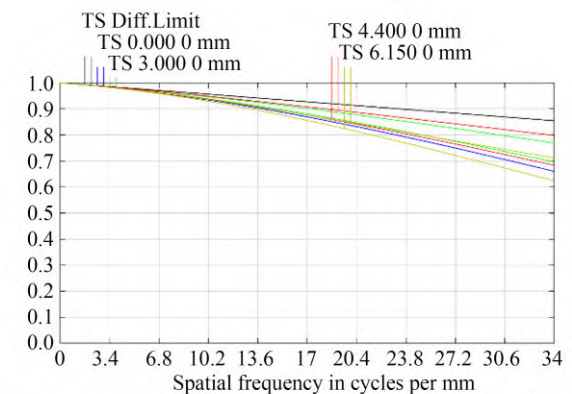
其中: Z_N 为清晰成像的近景边界距离, Z_F 为远景距离, f 为镜头焦距, $\delta z'$ 为焦深, z' 为像距,在工作物距 200 mm 处景深 δz 约为 2 mm。

活体小动物成像目标有一定的空间纵深范围(一般中心视场距离最近,四周视场在聚焦面远端),在对焦距离之外的区域于像面处于离焦状态,荧光点的具体表现为能量非均匀分布的弥散斑,即为焦外散斑“bokeh”^[27]。在系统焦距, F/#, 成像距离确定的情况下,影响焦外散斑尺寸、形状失真的主要因素为光学系统的像差。在设计过程中,球差的过矫正(负球差)会使得弥散斑边缘更亮,出现明显的高亮环带。通过

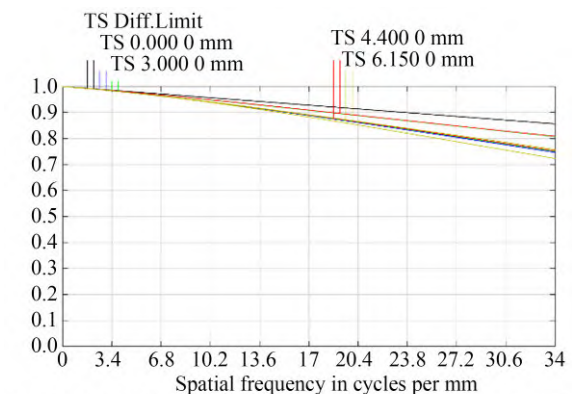
光学设计像差校正的角度优化焦外散斑。在焦面残留少许的正球差形成自然过渡,在景深范围外的焦外散斑过渡自然符合发光散射衰减特征。

3 设计与实验结果

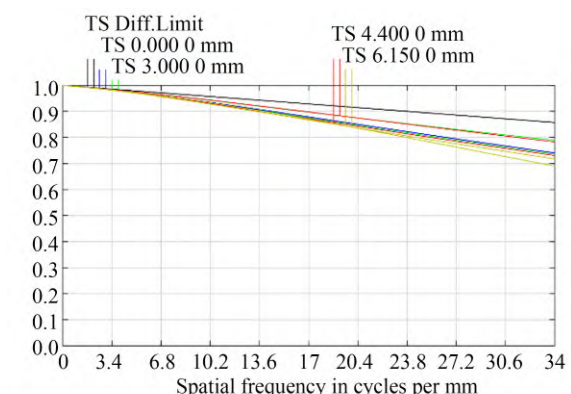
光学设计的像质评价标准以 Nyquist 频率处 (@34mm/lp) 的光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 为基准。镜组相对滤光片位置固定,采用整组移动方式保证整个工作距离内成像清晰,如图 5 所示全工作距离内像质均匀接近衍射极限,典型成像距离下的 MTF > 0.6,如图 6 和图 7 所示在 200 mm 工作距离处像面各视场点斑 RMS 直径均小于像元尺寸 15 μm 。边缘视场畸变小于 1%。通过焦面补偿能够保证单一窄波段下更优异的像质。如图 8 所示在景深范围内能够保证较好的成像质量。我们完成了



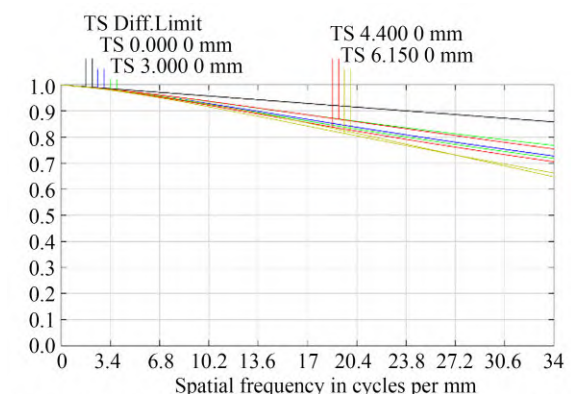
Data for 0.900 0 to 2.300 0 μm . Surface: Image Configuration 1 of 5
(a) @200 mm



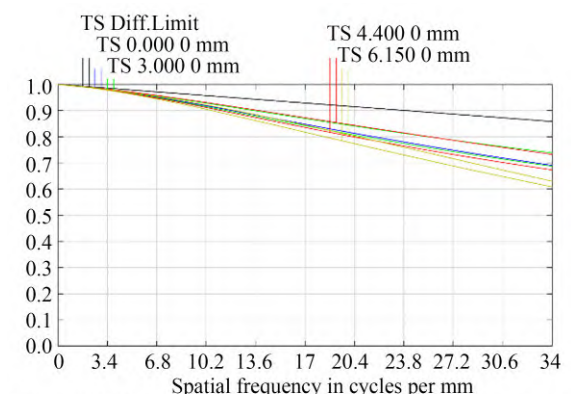
Data for 0.900 0 to 2.300 0 μm . Surface: Image Configuration 2 of 5
(b) @300 mm



Data for 0.900 0 to 2.300 0 μm . Surface: Image Configuration 3 of 5
(c) @400 mm



Data for 0.900 0 to 2.300 0 μm . Surface: Image Configuration 4 of 5
(d) @500 mm



Data for 0.900 0 to 2.300 0 μm . Surface: Image Configuration 5 of 5
(e) @600 mm

图 5 不同工作距离处光学系统的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF of optical system at various target distances

光机组件及相机的装调校准工作。如图 9(a)所示,通过搭建实验平台对分辨率靶标进行实际成像效果测试。中心与边缘视场均有极佳的对比如,画面整体像质均匀对称实验结果见图 9(b)。

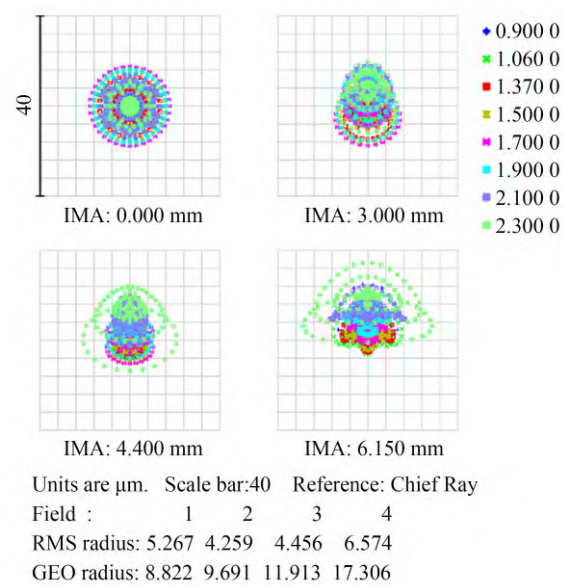


图 6 光学系统点列图

Fig. 6 Spot Diagram of the optical system

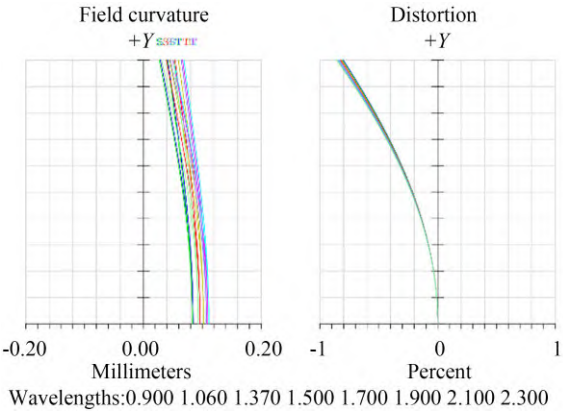


图 7 场曲及畸变图

Fig. 7 Field curvature & F-tan(theta) distortion

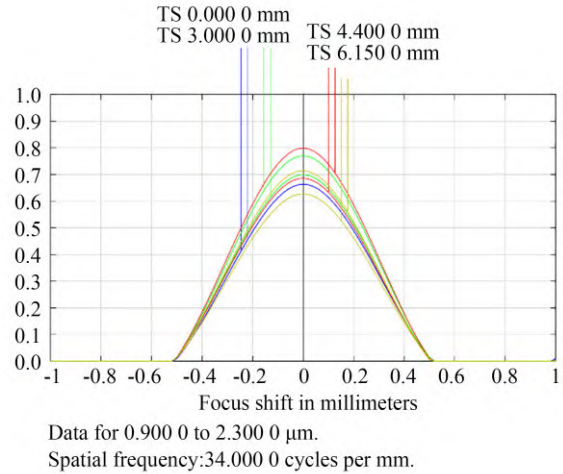
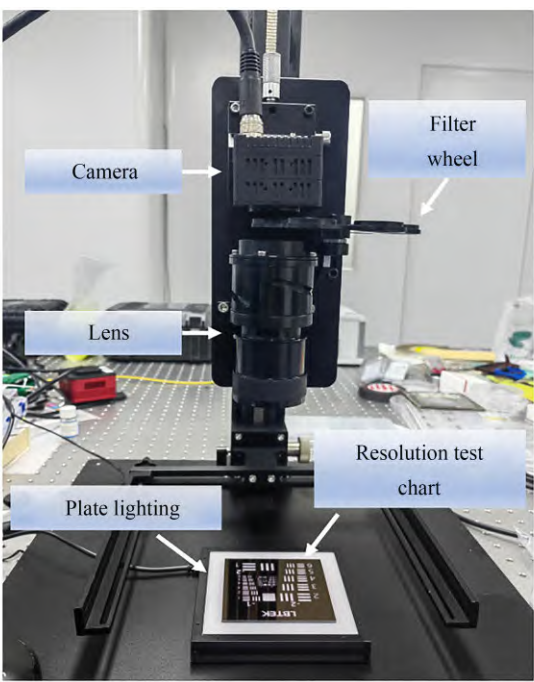


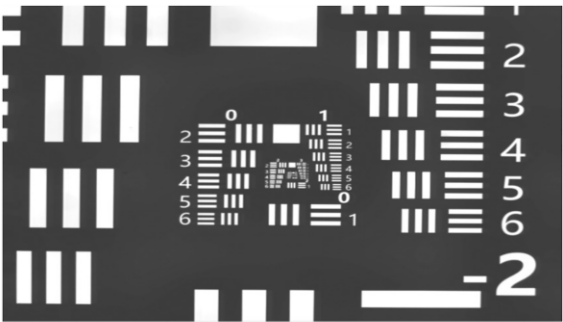
图 8 焦面附近的 MTF 变化曲线

Fig. 8 Polychromatic diffraction through focus MTF



(a) 成像实验平台

(a) Imaging experimental platform



(b) 分辨率靶实际成像效果@900 nm~1 700 nm

(b) Optical performance of lens @900 nm~1 700 nm

图 9 近红外二区成像实验系统

Fig. 9 Experimental system for NIR-II imaging

在设计完成后,分析光学加工及镜组装调中可能存在的误差,推测最终实际系统的像质表现概率分布;通过合理的公差容限兼顾可行性与制造成本。本系统在设计软件中的公差设置如表 2 所示。

对典型工作距离 200 mm 的组态进行公差分析,使用 MTF 对系统像质敏感度进行评价。5 000 次 Monte Carlo 仿真的结果如表 3 所示,全视场平均 MTF (@34 lp/mm) 90% 的概率大于 0.36 可以保证成像质量。

表 2 光学系统的公差分配

Tab. 2 Tolerance distribution parameters for optical systems

Torlerances	Limits
Radius(Fringes)	3
Thickness/mm	0.02
Surface decenter X, Y/mm	0.01
Surface tilt X, Y/(°)	0.01
Surface irregularity	0.3
Element decenter X, Y/mm	0.02
Element tilt X, Y/(°)	0.1

表 3 蒙特卡罗公差分析结果

Tab. 3 Result of Monte Carlo tolerance analysis

概率	MTF 值
98%	0.299 380 71
90%	0.360 931 96
80%	0.401 494 56
50%	0.480 058 43
20%	0.553 043 06
10%	0.586 725 46
2%	0.632 721 63

4 结 论

针对近红外二区荧光成像实验需求,本文设计了宽谱段成像镜组,仅采用三种玻璃材料,通过像差曲线指导优化设计流程,在 900~

2 300 nm 全波段工作距离内,全视场设计 MTF 均在 0.6 以上(@Nyquist 频率)在最小工作物距 200 mm 处景深范围内依然能够保证优异的成像。为相关成像实验提供了一种高品质光学解决方案。

参考文献:

[1] CHANG Y L, CHEN H R, XIE X Y, *et al.* Bright Tm³⁺-based downshifting luminescence nano-probe operating around 1800 nm for NIR-IIb and c bioimaging [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1079.

[2] 罗兴蕊,陈敏文,杨晴来. 近红外二区活体成像技术及其应用研究进展[J]. *化学学报*, 2020, 78(5): 373-381.

LUO X R, CHEN M W, YANG Q L. Research progress on near infrared II technology for *in vivo* imaging[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2020, 78(5): 373-381. (in Chinese)

[3] MI C, ZHANG X, YANG C Y, *et al.* Bone disease imaging through the near-infrared-II window [J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6287.

[4] 牛欣瑞. 用于近红外二区荧光成像指导下的新型光学诊疗探针的制备与应用[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.

NIU X R. *Preparation and Application of A New Optical Diagnostic Probe for Near Infrared Two-Zone Fluorescence Imaging* [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)

[5] 李惠珠,陈俊. 近红外二区荧光活体成像在细胞示踪上的应用进展[J]. *复旦学报(医学版)*, 2022, 49(3): 454-459, 474.

LI H Z, CHEN J. Advances on second near-infrared fluorescent applied in vivo imaging for cell

tracking [J]. *Fudan University Journal of Medical Sciences*, 2022, 49(3): 454-459, 474. (in Chinese)

[6] 张子建,徐欣,王吉祥,等. 光片荧光显微镜研究进展[J]. *光电工程*, 2023, 50(5): 220045

Zhang Z J, Xu X, Wang J X, *et al.* Review of the development of light sheet fluorescence microscopy [J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 220045. (in Chinese)

[7] WELSHER K, LIU Z, SHERLOCK S P, *et al.* A route to brightly fluorescent carbon nanotubes for near-infrared imaging in mice[J]. *Nature Nanotechnology*, 2009, 4: 773-780.

[8] WELSHER K, SHERLOCK S P, DAI H J. Deep-tissue anatomical imaging of mice using carbon nanotube fluorophores in the second near-infrared window [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(22): 8943-8948.

[9] HONG G S, DIAO S, CHANG J L, *et al.* Through-skull fluorescence imaging of the brain in a new near-infrared window [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 723-730.

[10] HUANG D H, LIN S Y, WANG Q W, *et al.* An NIR-II fluorescence/dual bioluminescence multiplexed imaging for *in vivo* visualizing the location, survival, and differentiation of transplanted stem cells [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(2): 1806546.

[11] Product Specifications: Canada [Z/OL] [2024-4-

- 24]. <https://www.photonetc.com/products/ir-vivo>
- [12] GA 1" SWIR 短波近红外镜头:中国[Z/OL][2024-4-24]. <https://www.gu-optics.com/SWIR-1.html>
- GA1" SWIR Lens: China [Z/OL][2024-4-24]. <https://www.gu-optics.com/SWIR-1.html>
- [13] 近红外二区活体成像系统:中国[Z/OL][2024-4-24]. <https://www.blflux.com/chanpin/showproduct.php?id=13>
- NIR-II Vivo Imaging System: China [Z/OL][2024-4-24]. <https://www.blflux.com/chanpin/showproduct.php?id=13>
- [14] LIU Z H, JIN W Q, LI L, *et al.* Four-band coaxial imaging experimental platform and its image fusion methods[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(1): 1-11.
- [15] 冯哲, 钱骏. 近红外二区荧光活体生物成像技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(6): 0617001.
- FENG Z, QIAN J. Advances on *in vivo* fluorescence bioimaging in the second near-infrared window[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(6): 0617001. (in Chinese)
- [16] RIEDL M J. *Optical Design: Applying the Fundamentals* [M]. Bellingham Wash.: SPIE Press, 2009.
- [17] KINGSLAKE R, JOHNSON R B. *Lens Design Fundamentals, Second Edition* [M]. Bellingham Press, 2010.
- [18] GARDNER M C, ROGERS P J, WILDE M F, *et al.* Challenges and Solutions for high performance swir lens design [C]. *SPIE Proceedings*, "Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII. Edinburgh, United Kingdom. SPIE, 2016.
- [19] SASIAN J. Method to design apochromat and superachromat objectives [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(10): 1.
- [20] JIANG Y, QUAN X Q, XING Y, *et al.* Design of optical imaging system for full-ocean-depth low-light colors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 154: 107042.
- [21] REN D Q. Apochromatic lenses for near-infrared astronomical instruments [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(3): 537.
- [22] SHEPARD R H, SPARROLD S W. Material selection for color correction in the short-wave infrared [C]. *SPIE Proceedings*, "Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX. San Diego, California, USA. SPIE, 2008.
- [23] OLSON C, GOODMAN T, ADDIEGO C, *et al.* Design and Construction of A Short-Wave Infrared 3.3x Continuous Zoom Lens[C]. *SPIE Proceedings*, "International Optical Design Conference 2010. Jackson Hole, WY. SPIE, 2010.
- [24] WARREN D W. Barium fluoride and glass combinations for short-wave infrared designs [C]. *SPIE Proceedings*, "Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XI; and Advances in Thin Film Coatings VI. San Diego, California, USA. SPIE, 2010: 778618.
- [25] WANG W, ZHONG X, LIU J, *et al.* Apochromatic lens design in the short-wave infrared band using the Buchdahl dispersion model [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 892-903.
- [26] 孙景浩, 杨照华, 吴云, 等. 基于消色差透镜的单像素与计算关联光谱成像[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2333-2342.
- SUN J H, YANG Z H, WU Y, *et al.* A single-pixel and computational ghost spectral imaging system based on achromatic lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2333-2342. (in Chinese)
- [27] NASSE H H. *Depth of Field and Bokeh* [R]. Carl Zeiss, 2010.

作者简介:



姜 洋(1984—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位(硕博连读),主要从事光学系统设计及仿真等相关研究工作。E-mail:le_zhi@yeah.net



赵东旭(1974—),男,辽宁新民人,博士、博士生导师,佛山大学教授,2002年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事高灵敏、高效率微纳光电探测器及应用研究。E-mail:zhaodx@fosu.edu.cn