

## 一种紧凑型光纤显微物镜的设计

任晓楠 曹雨 张伟

### Design of compact fiber microscope objective

REN Xiaonan, CAO Yu, ZHANG Wei

引用本文:

任晓楠, 曹雨, 张伟. 一种紧凑型光纤显微物镜的设计[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 802–809. DOI: 10.5768/JAO202142.0501007

REN Xiaonan, CAO Yu, ZHANG Wei. Design of compact fiber microscope objective[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 802–809. DOI: 10.5768/JAO202142.0501007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501007>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计

Design of compact continuous high zoom-ratio gun sighting telescope optical system

应用光学. 2021, 42(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301008>

#### 波前编码显微物镜景深扩展的研究

Research on extended field depth of wavefront coding microscope objective

应用光学. 2018, 39(4): 476–482 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0401006>

#### 紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

#### 紧凑型自由曲面离轴三反系统设计

Design of compact freeform off-axis three-mirror system

应用光学. 2018, 39(6): 780–784 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601003>

#### 大口径超长焦距紧凑型光学系统设计

Design of compact optical system with large aperture and ultra long focal length

应用光学. 2018, 39(5): 638–643 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0501008>

#### 大孔径长焦距摄远物镜光学系统设计

Optical system design of large aperture and long focal length telephoto objective lens

应用光学. 2020, 41(2): 276–281 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 05-0802-08

# 一种紧凑型光纤显微物镜的设计

任晓楠, 曹 雨, 张 伟

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 研发一部, 安徽 蚌埠 233006)

**摘 要:** 针对光纤通信网络建设及运维任务对光纤接续机器提出的便携小巧、精准可靠的需求, 开发了一种结构紧凑、成像清晰的光纤物镜。基于光学理论和实际使用要求对物镜的基本光学参数进行了分析, 利用 Zemax 软件设计出一种紧凑型高分辨率的光纤显微物镜, 该物镜包含 5 片常用牌号玻璃球面透镜, 放大倍率为 6 $\times$ , 数值孔径 0.24, 共轭距离 47.3 mm。系统具有良好的成像质量, 0.7 视场内奈奎斯特频率 60 lp/mm 处 MTF 大于 0.36, 在频率 90 lp/mm 处 MTF 大于 0.15。对设计结果进行了蒙特卡罗公差分析, 良品率超 90%, 装调较宽松, 成本低廉, 可进行批量生产。另外, 针对设计好的物镜进行成像过程仿真, 结果显示待接纤芯特征清晰锐利, 有利于机器对准接续。

**关键词:** 光学设计; 光纤通信; 紧凑型; 显微物镜; Zemax

中图分类号: TN253; TH703

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0501007

## Design of compact fiber microscope objective

REN Xiaonan, CAO Yu, ZHANG Wei

(The 1st Research and Development Department, The 41st Institute of CETC, Bengbu 233006, China)

**Abstract:** The construction, operation and maintenance of optical fiber communication network put forward the portable, compact, accurate and reliable requirements for the use of optical fiber connecting machine. To achieve this goal, an optical fiber objective with compact structure and clear imaging was developed. Based on optical theory and actual usage requirements, the basic optical parameters of the required objective were analyzed. An compact and high-resolution optical fiber microscope objective was designed by the Zemax software. The objective included 5 commonly used glass spherical lenses, with the magnification of 6 times, the numerical aperture of 0.24, and the conjugate distance of 47.3 mm. The objective system had the good imaging quality, in which the MTF was greater than 0.36 at the nyquist frequency of 60 lp/mm, greater than 0.15 at 90 lp/mm within 0.7 field of view. The design results were analyzed by Monte Carlo tolerance, and the yield rate was over 90%. The installation was loose and the cost was low, therefore the objective lens could be produced in large quantities. In addition, the imaging simulation of the designed objective lens shows that the features of the fiber core to be spliced are clear and sharp, which is beneficial to the alignment of the machines.

**Key words:** optical design; optical fiber communication; compact type; microscope objective; Zemax

## 引言

当今信息时代, 伴随 4G、物联网、云计算等的高速发展, 光纤通信已然成为信息传输的主力军, 光通信网络的建设与运维需要大量的光纤接续工

作, 光纤接续仪器在光通信领域中承担了重要角色。光纤接续仪器的关键性能指标是接续点的光功损耗, 高质量的接续点能保证两端光纤模场的高度耦合, 保证光信号的长距离传输。图 1 是常见

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-19

基金项目: 安徽省重点研究和开发计划 (201904a07020075)

作者简介: 任晓楠 (1989—), 男, 硕士, 主要从事光纤成像研究, E-mail: striving1destiny@126.com

光纤接续仪器成像系统示意图。图 1 左右两侧 45° 方向的 LED 光源对接续光纤进行照射<sup>[1]</sup>, 位于 X/Y 不同维度的光纤显微物镜将光纤细节成像到后端的图像传感器靶面, 软件通过输入的图像进行分析, 进而控制机构运动, 实现两端光纤在物理空间上的靠近对准。

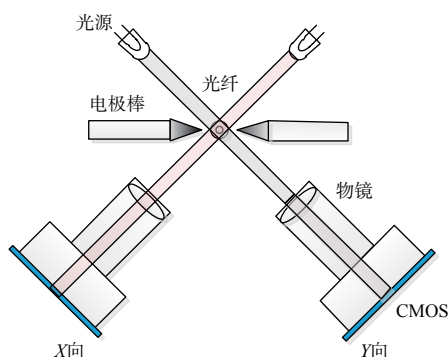


图 1 光纤接续仪器成像系统示意图

Fig. 1 Imaging system schematic diagram of fiber fusion splicer instrument

光纤接续仪器为实现对两端光纤的精准同轴对接, 需要显微物镜具有较高的分辨率, 能够获取光纤纤芯的完备信息。显微物镜作为接续仪器的“眼睛”, 近些年来受到不少研究, 2010 年上海理工大学的孙晶露等人<sup>[2]</sup>等采用反向光路优化设计出一种数值孔径 0.3、放大倍率 8×、共轭距 65 mm 的显微物镜, 由 5 片玻璃透镜组成, 工作在 630 nm 波长下用于纤芯检测; 2015 年福建师范大学的陈丽娜等人<sup>[3]</sup>采用正向光路优化设计出一种数值孔径为 0.25、放大倍率 8×、共轭距为 85 mm 的高清显微物镜, 由 6 片玻璃透镜组成, 可在白光条件下实现纤芯的观察; 2016 年日本株式会社<sup>[4]</sup>开发出一种可进行微动调焦的高清显微物镜, 有助于寻找 2 个待熔光纤纤芯的中心, 可有效降低不同类光纤熔接的损耗; 2017 年西安光谷公司<sup>[5]</sup>开发出一种工作在 630 nm 波长下用于纤芯识别的显微物镜, 该物镜数值孔径为 0.3、放大倍率 4.3×、共轭距为 52 mm, 解像力仅达到 50 lp/mm; 日本住友和藤仓分别于 2016 年和 2018 年研发出一款紧凑型显微物镜, 虽不能观察纤芯细节, 但适用于 FTTH 工程光纤接续仪器市场的需求<sup>[6-7]</sup>。

显微物镜的共轭距离 (光纤到 CMOS 的距离) 直接决定整个接续仪器的体积, 如果接续仪器体积较大, 一方面增加材料成本和加工成本, 另一方面不便于技术工人的携带及操作, 也降低

光网建设和维护效率。目前, 城域网干线及 5G 基站等加速建设, 运营市场上对便携式光纤接续机器的需求越来越大。为此, 研究开发一种较短共轭距用于纤芯对准的紧凑型光纤显微物镜显得十分必要。

## 1 聚焦物体建模分析

光纤由包层和纤芯组成, 两者是折射率相近的透明材料, 显微物镜很难直接清晰观察包裹在内部的纤芯, 若要做到对光纤纤芯精确定位, 就需要借助光纤对侧面平行光束的会聚投影, 如图 2 所示。均匀照明光束经纤芯和包层不同地折射在光纤后半部某平面形成一定的能量图样, 纤芯粗细及折射率的变化直接影响能量图样, 光纤显微物镜可通过对此能量图样的观察间接实现纤芯的定位。

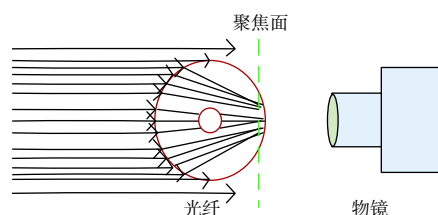


图 2 物镜聚焦观察示意图

Fig. 2 Schematic diagram of objective focusing observation

为了解图样细节与纤芯参数的关系, 需要进行建模分析。以通信网络常用的 G652 单模光纤为例, 包层直径 125 μm, 纤芯直径 9 μm, 以横截面圆心为原点建立直角坐标系。假定光轴到光线、光线到法线、光轴到法线的角度, 逆时针为正, 顺时针为负, 平行光线从左方射入, 不同入射高度具有不同的入射角。由于包层和纤芯之间直径差异, 从而存在两种折射光线。折射光线穿过纤芯如图 3 所示, 折射光线偏出纤芯如图 4 所示。

当折射光线穿过纤芯时, 依据斯涅耳折射定律和几何关系可得出下述关系式:

$$\left. \begin{aligned} \sin(-\theta) &= n_{\text{包}} \sin(-\theta_1) \\ \frac{\sin(-\theta_1)}{r} &= \frac{\sin(-\theta_2)}{R} \\ n_{\text{包}} \sin(-\theta_2) &= n_{\text{芯}} \sin(-\theta_3) \\ \theta_6 &= \theta_2 - 2\theta_3 + \theta - \theta_1 \\ \theta_8 &= 2\theta_2 - 2\theta_3 + \theta - \theta_1 \\ k &= \tan[\pi - (-\theta_8)] = \tan\theta_8 \\ y - r \sin\theta_6 &= k(x - r \cos\theta_6) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\theta$  和  $\theta_1$  为光线相对于空气包层界面的入射角和折射角;  $\theta_2$  和  $\theta_3$  为光线相对于包层纤芯界面的

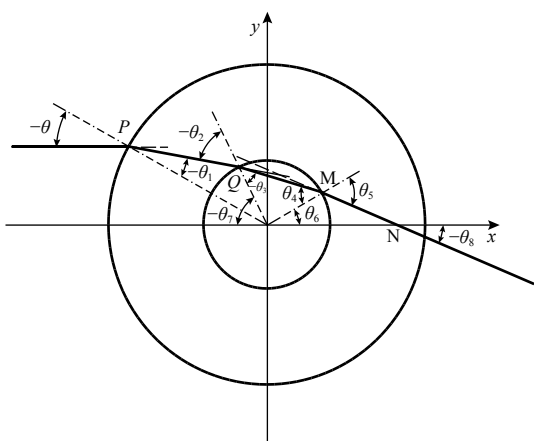


图3 光线穿过纤芯

Fig. 3 Beam through fiber core

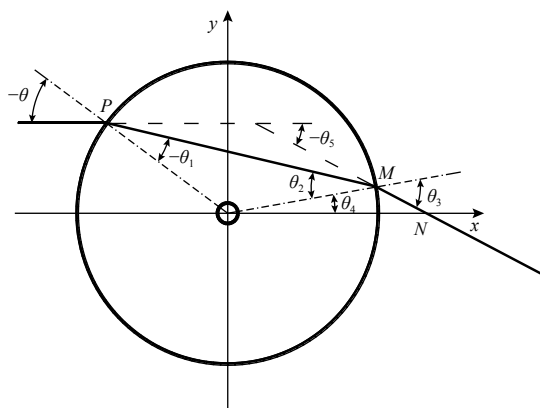


图4 光线偏离纤芯

Fig. 4 Beam deviates fiber core

入射角和折射角;  $\theta_6$  为纤芯出射点  $M$  对应的圆心角;  $\theta_8$  为纤芯出射光线所在直线与光轴夹角;  $R$  和  $r$  分别为包层及纤芯半径;  $n_{\text{包}}$  和  $n_{\text{芯}}$  分别为包层及纤芯的折射率。当折射光线偏出纤芯时, 依据斯涅耳折射定律和几何关系可得出下述关系式:

$$\left. \begin{aligned} \sin(-\theta) &= n_{\text{包}} \sin(-\theta_1); \\ \theta_2 &= -\theta_1; \theta_3 = -\theta; \\ \theta_5 &= -2(\theta_3 - \theta_2); \theta_4 = 2\theta_2 - \theta_3; \\ k_1 &= \tan[\pi - (-\theta_5)] = \tan\theta_5; \\ y - R\sin\theta_4 &= k_1(x - R\cos\theta_4) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  和  $\theta_1$  为入射光线相对于空气包层界面的入射角和折射角;  $\theta_2$  和  $\theta_3$  为出射光线相对于包层空气界面的入射角和折射角;  $\theta_4$  为纤芯出射点  $M$  对应的圆心角;  $\theta_5$  为纤芯出射光线所在直线与光轴夹角;  $R$  和  $r$  分别为包层及纤芯半径;  $n_{\text{包}}$  和  $n_{\text{芯}}$  分别为包层及纤芯的折射率。通过上述关系式(1)和(2)中直线方程可计算出不同光线在光纤右半部某平面(例如  $x=60$ )上的投射高度, 通过编写程序并赋值运行, 结果如图5所示。图5中实线代表经纤

芯偏折后不同出射光线的投射; 虚线代表进入包层发生偏折后传输光线的投射, 两者交界处出现间断, 如此投射平面上的能量图样应呈现对称明暗条纹。

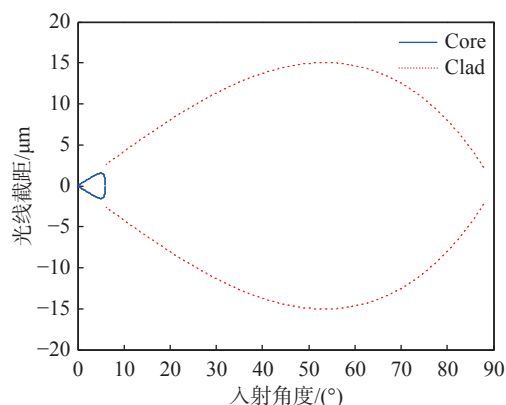


图5 不同入射光线的投射高度

Fig. 5 Projection height of beams with different incident angles

## 2 设计过程

### 2.1 输入分析

光纤显微物镜作为一种有限远成像系统, 遵循传统几何光学的高斯定律, 在确定光学设计输入或成像系统特性时需要着重关注3个基本光学指标<sup>[8]</sup>: 数值孔径  $A_N$ 、放大倍数  $\beta$  及观察视场  $y$ , 此外还有与基本指标相关联的辅助参数, 如工作距离  $D_W$ 、共轭距离  $L$ 、工作波长  $\lambda$  等。

1) 数值孔径  $A_N$  的确定 物镜的分辨能力与所观察物体细节有关, 由图5可知, 聚焦面具有的能量图样是包层背影下对称的明暗条纹, 物镜成像在保证还原包层轮廓的同时, 还需要分辨中间的纤芯, 中间亮纹代表纤芯的折射作用。所以计算可得中间亮纹的宽度为  $2.8 \mu\text{m}$ , 即所需最小分辨间隔为  $2.8 \mu\text{m}$ , 在此我们可取  $2.5 \mu\text{m}$  作为物镜的分辨率。光纤物镜作为一种显微物镜, 其分辨能力与物方数值孔径有关<sup>[9]</sup>, 由此可得出下式:

$$\varepsilon = 0.61\lambda/A_N 2.5 \mu\text{m} \quad (3)$$

另外, 物镜成像到 CMOS 是一个模数转换过程, 根据奈奎斯特采样定律<sup>[10]</sup>可得到下式:

$$4A_N/\lambda\beta < 1/d \quad (4)$$

2) 放大倍率  $\beta$  的确定 放大倍率的大小直接影响着机器屏幕上光纤成像宽度, 为便于机器功能调试, 屏占比一般以  $1/2 \sim 3/4$  为佳。在传统分析中, 显微物镜的总景深是几何景深与物理景深的



叠加<sup>[11-13]</sup>, 即:

$$d_{\text{tot}} = d_g + d_p = ne / (\beta \cdot A_N) + n\lambda / A_N^2 \quad (5)$$

式中:  $e$  为像方模糊圆。由(5)式可知放大倍率较大时, 物镜的几何景深小, 不利于对光纤清晰成像。

3) 观察线视场  $y$  的确定 物镜成像系统具有旋转对称性, 像方视场要覆盖 CMOS 矩形感光面的外接圆, 由此可得出:

$$2y \cdot \beta = 2y' \geq l' \quad (6)$$

式中:  $l'$  为 CMOS 对角线长。选取中心波长 630 nm 的 LED 作为照明光源, 以 0.85 cm (1/3 英寸, 成像圆对角线长为 6 mm) 像元为 4.2  $\mu\text{m}$  百万像素的 CMOS 作为像接收器, 为便于机架缩小体积, 物镜共轭距小于 50 mm, 避免光纤熔化物吸附堆积镜片, 工作距离应大于 10 mm。综合(3)式~(6)式, 可得该系统的设计要求如表 1 所示。

表 1 物镜设计要求

Table 1 Design requirements of objective

放大倍数 $\beta$	数值孔径 $A_N$	线视场 $y$	工作距离 $D_W$	共轭距离 $L_T$
6 $^\circ$	0.24	0.5 mm	10.4 mm	47 mm

## 2.2 设计优化

为了在较小共轭距离及较大工作距离下实现平场放大成像, 物镜系统选用正、负透镜组分离的

远摄型初始结构<sup>[14-15]</sup>。正透镜组由 1 个双胶合透镜加上 2 个单透镜组成, 胶合透镜采用阿贝数之差较大的冕牌/火石玻璃透镜搭配进行胶合<sup>[14]</sup>, 一般正透镜为冕牌, 负透镜为火石<sup>[16]</sup>, 用于校正轴向色差。负透镜组采用一个单透镜, 用于平衡剩余球差。

根据光学设计经验, 折射面存在较大的偏转角会引入更多高阶像差, 为便于设计优化中平衡像差, 一般单透镜偏转角小于 0.15 rad, 双胶合透镜偏转角小于 0.2 rad。由表 1 可知, 显微物镜的总偏角为  $\delta=0.28$  rad, 可取正透镜偏角为 0.14 rad, 双胶合透镜偏角为 0.1 rad, 负透镜偏角为 -0.11 rad。为简化计算, 可把光学系统看作是由多个理想薄透镜组成的<sup>[8, 17]</sup>, 建立理想初始结构如图 6 所示。

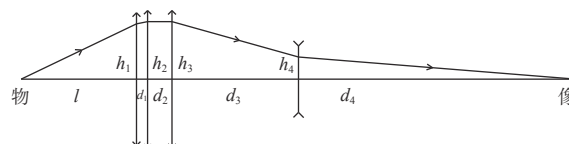


图 6 初始薄透镜组示意图

Fig. 6 Schematic diagram of thin lens group

根据几何光学公式:

$$\delta_i = u'_i - u_i = h_i \varphi_i; h_{i+1} = h_i - d_i u'_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

可求取每个理想薄透镜(组)的投射高度  $h_i$  及光焦度  $\varphi_i$ , 如表 2 所示。

表 2 薄透镜参数

Table 2 Parameters of thin lens group

$d_1/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$	$d_3/\text{mm}$	$d_4/\text{mm}$	$h_1/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$h_3/\text{mm}$	$h_4/\text{mm}$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$
1	2.2	11.4	22	2.496	2.596	2.596	0.88	0.056	0.038	0.054	-0.126

根据上述计算数据在 Zemax 软件中对物镜初始结构进行建模, 初始给定正、负透镜的玻璃材料依次分别为 H-ZK10 和 H-ZF2, 并根据厚透镜光焦度公式将薄透镜组逐个变成有一定曲率和厚度数值的真实镜片, 通过适当参数调整, 可使结构存在一定程度的波像差, 并能够进行计算优化。此时物镜系统的成像质量一般比较差, 需要进行多次优化改善。

依次对镜片曲率半径、空气层、镜片厚度及镜片材质设置变量, 采用 Zemax 软件默认评价函数和自定义操作数结合的方式对优化过程进行控制。自定义操作数分为控制基本结构参数和像差变化, 主要功能如下:

PMAG 控制物镜放大倍率, TTHI 控制系统工作距和共轭距, LONA 控制不同视场球差变化, TRAY 与 DIFF 控制轴外视场彗差, AXCL 控制轴向色差, DIMX 与 OPLT 控制畸变。

通过多次局部优化和锤形优化, 评价函数得到较好的收敛, 弥散斑明显减小, 最终获得一个光线平滑、成像良好的系统。

## 2.3 结果分析

优化完成的结构布局如图 7 所示。共轭距离 47.3 mm, 工作距离 10.32 mm, 放大倍数 6 $^\circ$ , 满足设计要求。组成系统的 5 片球面透镜牌号均来自于成都光明玻璃库, 分别为 H-ZK10、H-ZF52A/H-K9L、H-ZLAF52A 和 H-QK3L, 生产频次较高,

硬度适中,化学特性稳定,可有效减少生产加工成本。

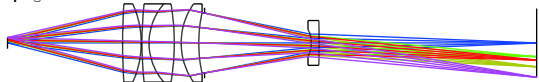


图 7 显微物镜布局

Fig. 7 Layout of microscope objective

图 8 为物镜系统的点列图。由图 8 可以看出,系统各视场的弥散斑均方根均小于艾里斑半径,能量分布集中,成像性能良好。图 9 为物镜系统的场曲和畸变图。场曲反应整个像面弯曲状况,畸变反映成像画面变形大小,光纤对象主要集中在物镜轴上区域视场。由图 9 可知,系统畸变小于 1%,场曲小于 0.1 mm,满足系统要求。图 10 是相对照度曲线,代表整个成像圆内的亮度变化。由图 10 可知边缘视场相对照度为 0.95,满足成像背景均匀要求。

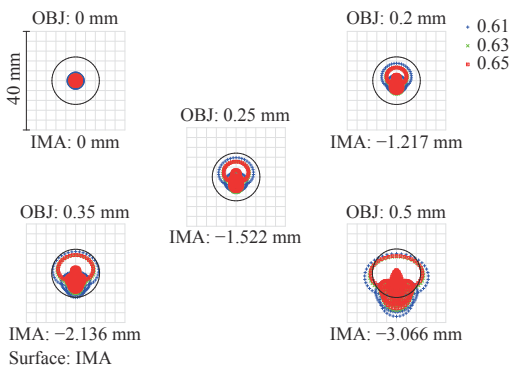


图 8 点列图

Fig. 8 Spot diagrams

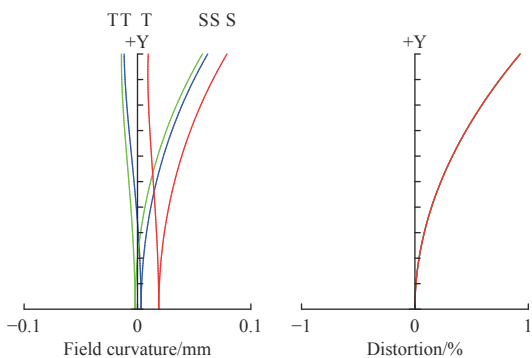


图 9 场曲与畸变

Fig. 9 Curvature and distortion

图 11 是系统球差曲线。由图 11 可知,光瞳内存在 2 种球差,负球差缓慢变成正球差,有利于会聚光线在高斯像面弥散斑的减小;边缘光球差虽没有校正为零,但其数值 0.08 mm 处于焦深范围

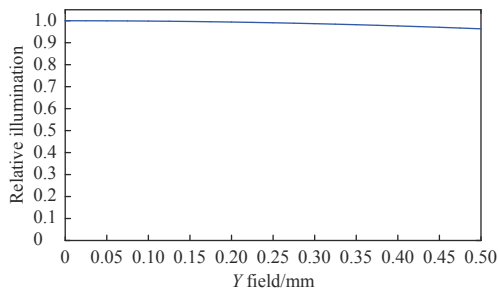


图 10 相对照度

Fig. 10 Relative illumination

内,满足成像要求。图 12 是显微物镜的 MTF 曲线,MTF 反映不同频率下对比度的传递能力,一般来说高频部分反映物体细节,中频部分反映物体层次,低频部分反映物体轮廓<sup>[18]</sup>。显微物镜是一种视场较小孔径较大的系统,应该保证轴上点和近轴点具有很好的成像质量,由图 12 可知,0.7 视场以内的 MTF 数值接近于衍射极限,在 1/2 奈奎斯特频率 60 lp/mm 处 MTF 均大于 0.36,在 2/3 奈奎斯特频率 90 lp/mm 处 MTF 均大于 0.15,具有较好的成像质量。

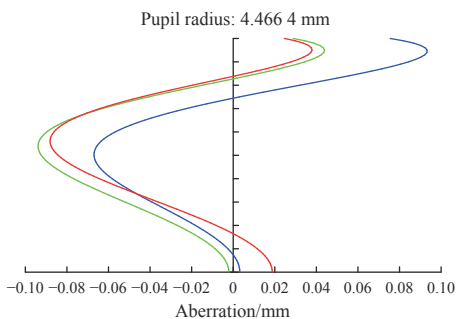


图 11 球差

Fig. 11 Spherical aberration

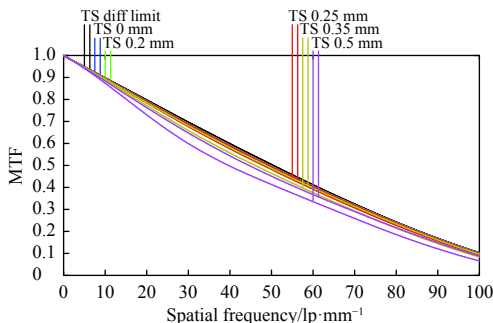


图 12 MTF 曲线

Fig. 12 MTF curves

## 2.4 公差分析

公差分析是理论设计转变为量产产品的关键步骤,给予合理的公差分配能够有效确定工艺标

表 3 公差要求

Table 3 Tolerance requirements

Fringes	厚度/mm	偏心/mm (surface)	倾斜/( $^{\circ}$ ) (surface)	偏心/mm (element)	倾斜/( $^{\circ}$ ) (element)	Index	阿贝数/%
4/0.3	$\pm 0.02$	$\pm 0.01$	1.5	$\pm 0.01$	1.5	0.000 5	0.5

准, 保证光学性能和良品率。表 3 为该系统的初步公差要求。

以 60 lp/mm 处的衍射 MTF 平均值作为评价标准进行灵敏度公差分析。结果显示对 MTF 值影响较大的公差操作数有 TFRN 6、TFRN 7、TTHI 6、TSDX(TSDY)6 和 TSDX(TSDY)7, 对像质影响较大的是第 4 片透镜的表面面形、表面偏心和镜片厚度, 第 4 片透镜承担较大的偏转角, 生产加工时需要对其进行严格控制。将第 4 片透镜的表面光圈和表面偏心的公差分别设为 3 和 0.005, 镜片厚度设为 0.01 mm, 再次进行公差分析后性能显著提高。表 4 和图 13 分别为蒙特卡罗模拟分析数据和曲线图。可以看到 90% 的 MTF 值大于 0.18, 满足 CMOS 系统的 MTF 阈值<sup>[18]</sup>, 说明上述公差分配满足实际批量生产装配要求。

表 4 蒙特卡罗分析结果

Table 4 Analysis results of Monte Carlo

蒙特卡罗分析	MTF
90%>	0.186 453 984
50%>	0.274 082 719
10%>	0.341 992 759

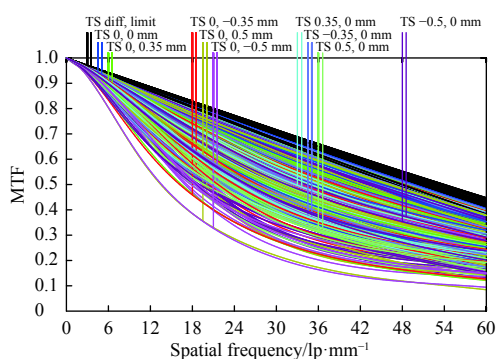


图 13 MTF 公差分析

Fig. 13 Tolerance analysis of MTF

### 3 仿真测试

在 Zemax 中将上述设计镜组的外径及间距固定, 从序列模式转变成非序列模式<sup>[19]</sup>, 添加光源和

探测器进行照明仿真, 探测物镜成像效果。首先在镜组前端分别添加设置 Source ellipse 和 4 个 Cylinder volume 可实现圆型面光源和 2 段光纤物体; 然后在镜组后端添加设置 2 个 Detector rect 形成 2 种矩形探测器, 第 1 个探测器放置在光纤后半部截面, 记录平行光束在光纤后端形成的强度图样, 第 2 个探测器放置在光纤物体的共轭位置, 记录物镜对光纤的成像, 建立的最终模型如图 14 所示。面光源发出的均匀准直光束侧向投射光纤, 经光纤的折射作用向外扩散, 携带能量图样高频信息的扩散光束能够充满并进入物镜通光口径参与成像。

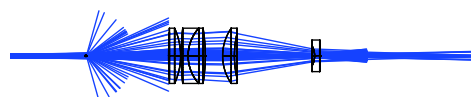


图 14 光纤显微物镜的成像仿真

Fig. 14 Imaging simulation of compact fiber microscope objective

使用 3 种不同均匀度的准直光束对物镜进行光线追迹, 探测器 1 可一致呈现如图 15 所示辐射照度图样; 探测器 2 可呈现如图 16~图 18 所示辐射照度图样, 分别代表照明均匀度为 0.73、0.85 和 0.98 下的能量分布。探测器 1 中间出现上下对称的明暗条纹, 印证上述光纤会聚光束产生明暗条纹的理论分析; 探测器 2 可看到光纤包层成像边缘

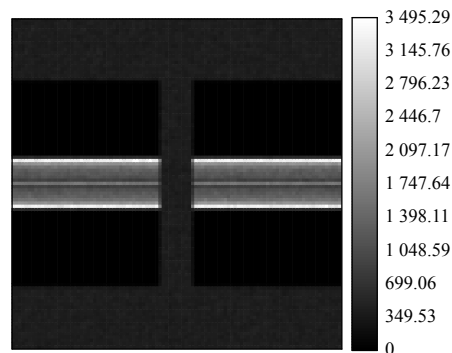


图 15 探测器 1 辐照度图样

Fig. 15 Irradiance diagram of detector 1

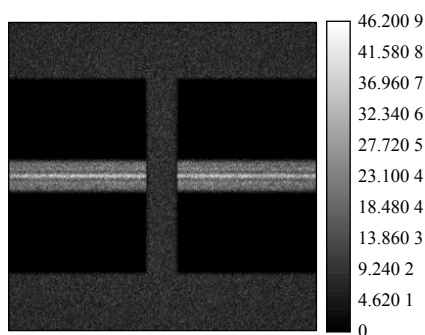


图 16 探测器 2 辐照度图样(照明均匀度 0.73)

Fig. 16 Irradiance diagram of detector 2 with illumination uniformity of 0.73

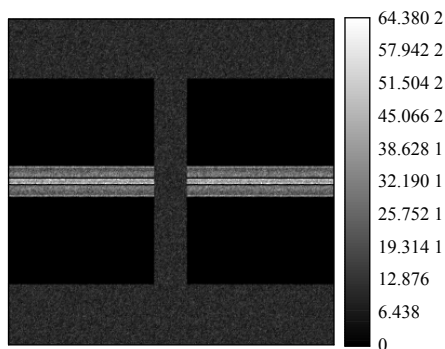


图 17 探测器 2 辐照度图样(照明均匀度 0.85)

Fig. 17 Irradiance diagram of detector 2 with illumination uniformity of 0.85

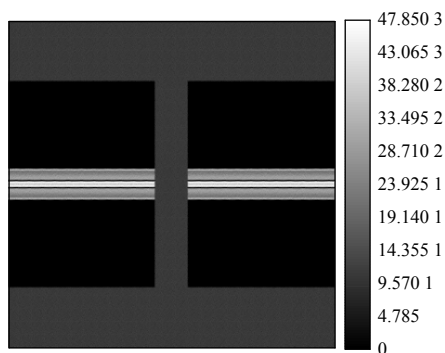


图 18 探测器 2 辐照度图样(照明均匀度 0.98)

Fig. 18 Irradiance diagram of detector 2 with illumination uniformity of 0.98

清晰,中间区域同样呈现明暗条纹分布,中央条纹代表纤芯成像,由于物镜较小的负球差,可使纤芯条纹相比背景具有较高的亮度,有利于图像处理时快速提取纤芯特征,保障光纤纤芯对准;同时通过对比观察图 16~图 18 可以看出,在照明均匀性提高时,光纤包层成像边缘轮廓清晰锐利,中间纤芯条纹特征更为突出。

## 4 结论

本文设计了一种紧凑型高清光纤显微物镜,通过参数分析和结构优化得到的物镜放大倍率为  $6\times$ ,共轭距为 47.3 mm,0.7 视场以内 MTF 在 60 lp/mm 大于 0.36,具有良好成像质量。物镜由 5 片常规牌号玻璃透镜组成。公差分析显示生产组装较宽松,良品率超 90%,加工装调成本较低,适合批量生产。与此同时,对所设计物镜进行照明仿真,结果显示该物镜能够在较小空间内实现光纤成像包层边缘锐利,其纤芯成像清晰,对小型便携式光纤接续仪器的量产以及性能优化具有一定的作用。

## 参考文献:

- [1] 王顺,张益昕,张旭苹,等.便携式单模光纤熔接机图像系统的研制[C]//2009中国仪器仪表与测控技术大会论文集.北京:中国仪器仪表学会,2009:473-476.  
WANG Shun, ZHANG Yixin, ZHANG Xuping, et al. Development of image system for portable single-mode fiber fusion machine[C]//Proceedings of 2009 China Instrument and Measurement & Control Conference. Beijing: China Instrument and Control Society, 2009: 473-476.
- [2] 孙晶露,李湘宁,吴宇昊.用于光纤熔接系统的纤芯检测镜头设计[J].光学技术,2010,36(6):816-819.  
SUN Jinglu, LI Xiangning, WU Yuhao. Design of fiber core detection lens for fiber fusion system[J]. Optical Technology, 2010, 36(6): 816-819.
- [3] 陈丽娜,刘巧玲,柯华恒,等.光纤熔接机高清显微物镜光学系统设计[J].光学仪器,2015,37(2):154-159.  
CHEN Lina, LIU Qiaoling, KE Huaheng, et al. Design of high definition microscopic objective optical system for fiber fusion machine[J]. 2015, 37(2): 154-159.
- [4] SATO P, HOMMA T. Optical fiber fusion splicer and optical fiber fusion splicing method: US10054742B2[P]. 2018-08-21.
- [5] 李向阳.光纤熔接机纤芯识别光学及成像系统: CN107121727B[P]. 2019-05-24.  
LI Xiangyang. Optical and imaging system of fiber core recognition for fiber fusion machine: CN107121727B[P]. 2019-05-24.
- [6] Sumitomo Electric. T400S Product manual[M/OL]. [2021-01-10]. Japan: Sumitomo Electric. <http://www.seac-china.com/products/data/T-400S-SFC-D001.pdf>.
- [7] Fujikura Ltd. 38S product manual[M/OL]. [2021-01-05].



- Shanghai: Fujikura Ltd. [http://www.fujikura.com.cn/cn/products/cable/connection/details/\\_icsFiles/afiedfile/2020/07/23/38S\\_KIt\\_91330\\_2006\\_0006\\_04\\_china.pdf](http://www.fujikura.com.cn/cn/products/cable/connection/details/_icsFiles/afiedfile/2020/07/23/38S_KIt_91330_2006_0006_04_china.pdf).
- [ 8 ] 唐勇, 李玉瑶. ZEMAX在光学设计外形尺寸计算中的应用[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 193-196.
- TANG Yong, LI Yuyao. Application of ZEMAX in calculation of optical design shape dimension[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(2): 193-196.
- [ 9 ] POTSAID B, BELLOUARD Y, WEN J T. Adaptive scanning optical microscope (ASOM): a multidisciplinary optical microscope design for large field of view and high resolution imaging.[J]. *Optics Express*, 2005, 13(17): 6504-6518.
- [ 10 ] 苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 160-164.
- SU Xianyu, LI Jitao. Information optics[M]. Beijing: Science Press, 2009: 160-164.
- [ 11 ] ABRAMOWITZ M, SPRING K R, KELLER H E, et al. Basic principles of microscope objectives[J]. *Biotechniques*, 2002, 33(4): 772-781.
- [ 12 ] LIM Y T, PARK J H, KWON K C, et al. Analysis on enhanced depth of field for integral imaging microscope[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23480-23488.
- [ 13 ] 徐小海, 张青川, 程腾. 基于微透镜阵列的光场显微镜实验研究[J]. 光子学报, 2017, 46(增刊1): 34-38.
- XU Xiaohai, ZHANG Qingchuan, CHENG Teng. Experimental study of light field microscope based on microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(S1): 34-38.
- [ 14 ] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 124-132.
- LI Xiaotong, CEN Zhaofeng. Geometric optics - aberration - optical design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 124-132.
- [ 15 ] 刘钧, 高明. 光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- LIU Jun, GAO Ming. Optical design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [ 16 ] 刘仲禹, 张欣婷, 吴倩倩. 高分辨率紫外/可见宽波段显微物镜设计[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 575-578.
- LIU Zhongyu, ZHANG Xinting, WU Qianqian. Design of high resolution ultraviolet/visible wide band microscopic objective lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 575-578.
- [ 17 ] 侯国柱, 吕丽军, 曹一青. 基于ZEMAX的大视场投影镜头设计[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 742-746.
- HOU Guozhu, LYU Lijun, CAO Yiqing. Design of large field projection lens based on ZEMAX[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(5): 742-746.
- [ 18 ] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 40-42.
- XIAO Zexin. Engineering optical design[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 40-42.
- [ 19 ] 林晓阳. ZEMAX光学设计超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- LIN Xiaoyang. Super learning manual of ZEMAX optical design[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2014.