

近红外大数值孔径平场显微物镜设计

周恩源, 刘丽辉, 刘岩, 曹振

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为满足飞秒激光微纳加工系统对高加工精度和大加工范围的需求, 首先确定了该系统的重要组成部分—无限共轭距显微物镜所需具备的特性及设计指标。依据薄透镜组的初级像差理论, 针对飞秒激光波长推导出光学系统为校正匹兹凡场曲和二级光谱所需满足的条件。该镜头由 11 片球面透镜构成, 所选用材料皆为国产玻璃, 同时避免三胶合结构的使用。设计了一套工作波长为 785~815 nm, 数值孔径为 0.9, 像方视场为 22.5 mm, 放大倍率为 40× 的近红外平场复消色差显微物镜。设计结果表明: 该镜头的 MTF 良好, 全视场波像差均小于 0.08λ , 各种几何像差均远小于公差且满足平场和复消色差条件, 能量集中度高。使用补偿器放松材料公差、加工公差和装调公差, 公差分配后全视场 RMS 波像差小于 0.09λ , 满足实际应用要求。

关键词: 光学设计; 显微物镜; 平场; 飞秒激光; 微纳加工

中图分类号: TH703; TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0718006

Design of high NA flat-field microscope objective for near infrared

Zhou Enyuan, Liu Lihui, Liu Yan, Cao Zhen

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To meet the requirements of femtosecond laser micro-nanofabrication systems for high precision and wide region, the features and design specifications of infinity microscope objectives which were important components of the systems were determined. Based on the theory of primary aberration of thin lens system, the conditions to meet were concluded to correct Petzval curvature and second order spectrum for femtosecond wavelength. The objective consisted of 11 spherical lens, and all materials were glass made in China, and the use of cemented lens composed of three lens was avoided. A near infrared flat-field microscope objective, whose working wavelength was 785–815 nm, numerical aperture was 0.9, field of view in image space was 22.5 mm, magnification was 40×, was designed. Designing results show that the objective has excellent MTF, RMS wavefront errors of all fields are less than 0.08λ , and various geometrical aberrations are deeply under tolerances, the results meet the conditions of flat field and apochromatism, and energy concentration is high. Compensators are used to slacken material tolerance, manufacturing tolerances and alignment tolerances. RMS wavefront errors of all fields get less than 0.09λ after tolerances attribution and the objective can be applied actually.

Key words: optical design; microscope objective; flat field; femtosecond laser; micro-nanofabrication

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(61435005)

作者简介: 周恩源(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: lmy1989@bit.edu.cn

导师简介: 刘丽辉(1975-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电传感技术及高分辨率成像方面的研究。Email: liulihui@bit.edu.cn

0 引言

与传统的微纳加工技术相比,激光微纳加工技术具有不接触、结构简单、精度更高、绿色环保等优点。飞秒(10^{-15} s)脉冲激光双光子微纳加工技术利用双光子吸收效应和激光与物质作用的阈值效应,可实现纳米尺度的激光直写加工分辨率,具有广阔的应用前景^[1-2]。

大数值孔径显微物镜具有高分辨力,用于聚焦飞秒激光进行微纳加工可以获得超高的加工精度。双光子聚合材料吸收峰一般在 250~400 nm,为使聚焦激光可以深入到材料内部诱发单体聚合实现三维加工,通常采用长波激光(中心波长 800 nm 左右)作为诱发光以减小光能损失,提升穿透性^[3]。国内显微物镜研究方向仍主要为可见光及紫外波段大数值孔径、大视场平场复消色差显微物镜的设计^[4-6]。因此,科研机构 and 高校搭建的飞秒激光微纳加工系统大多使用奥林巴斯、尼康和蔡司等公司生产的显微物镜。这些镜头价格高昂,设计时大多以近红外光作为边缘波长。二维振镜结合压电微位移平台的飞秒激光微纳加工系统与其他系统相比具有加工速度快、定位精度高的优势,且系统在水平面的扫描加工范围由物镜的物方视场决定。为此文中针对飞秒激光(中心波长 800 nm,带宽 30 nm),从初级像差理论出发,结合光学设计软件 Code V 设计一款用于飞秒激光微纳加工的大数值孔径、大视场近红外平场显微物镜^[7-9],并对其进行公差分析。

1 光学系统设计

1.1 设计指标

根据显微物镜的分辨力公式^[10]:

$$R = \frac{0.61\lambda}{n' \sin U'_{\max}} = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (1)$$

在飞秒激光器输出波长(该设计针对实验室现有的中心波长为 800 nm、带宽为 30 nm 的飞秒激光器)不变的情况下,增大数值孔径是提高系统加工精度有效方法。浸液技术能够使显微物镜实现大于 1 的数值孔径,但此时校正像差困难,物镜系统结构极为复杂,且在使用时要保证液滴内没有气泡或浮粒,以免导致聚焦光斑发散,无法实现微米级加工精度^[11]。

综合以上因素,在不考虑利用双光子吸收效应提升加工分辨力的前提下,为实现亚微米级加工精度,数值孔径定为 0.9。系统的扫描加工范围可以表示为:

$$2y = \frac{2y'}{\beta} \quad (2)$$

式中: $2y'$ 为显微物镜的像方视场; β 为放大倍率,为获得较大扫描加工范围,要求物镜具有大视场和小倍率。设计时应约束显微物镜筒长不可过长,且具有较大的工作距离。在满足平场和复消色差条件的同时,公差分配后,全视场的RMS波像差必须接近 Marechal 判据^[12],即 $\frac{1}{14} \lambda$,且需要控制畸变。具体设计指标如表 1 所示。

表 1 物镜设计指标

Tab.1 Objective design specifications

Parameters	Specifications
Spectral range/nm	800±15
Field of view in image space/mm	22.5
Numerical aperture	0.9
Magnification	40×
Thickness of cover glass/mm	0.17
Working distance/mm	≥0.2
Total length/mm	≤50
Root mean square of wavefront error/λ	≤0.09
Distortion	≤0.5%

1.2 设计原理

对于可见光波段,要设计好平场复消色差显微物镜最主要的难点是找到较好的校正场曲和二级光谱的方法^[13]。该设计中,带宽相对较窄,故探讨用国产光学材料完成复消色差。以下从薄透镜组的初级像差理论出发,分别讨论校正场曲和二级光谱的方法。

根据薄透镜系统的像差级数^[14]:

$$S_{IV} = -2n' u' x_p' = J^2 \sum \mu \varphi \quad (3)$$

系统的匹兹凡场曲可以表示为:

$$x_p' = -\frac{J^2}{2n' u'} \sum \mu \varphi \quad (4)$$

式中: n', u', J 均为常数,因此在讨论场曲和光学系统结构之间关系时,只需对公式进行讨论即可。式中 $\mu = \sum \frac{\varphi_i}{n_i}$,对薄透镜组来说,总光焦度等于各个单透镜光焦度之和,即 $\varphi = \sum \varphi_i$,此外玻璃的折射率变

化范围很小,所以消场曲条件可以表示为:

$$\sum \frac{\varphi_i}{n_i} = \frac{1}{n} \sum \varphi_i = 0 \quad (5)$$

为校正场曲,透镜的光焦度必须有正有负。即必须同时包含正负透镜,这样才有可能使 $\sum \varphi_i = 0$,且正负透镜必须分离,因为正负薄透镜密接的薄透镜组在 $\sum \varphi_i = 0$ 时,总光焦度为 0。另一种能够校正场曲的结构是弯月形厚透镜,其可以看作是由一个平凸薄透镜、一个平凹薄透镜和一块平板玻璃组成。平板玻璃由于两个表面的曲率均为 0,所以不产生场曲。因此该透镜的场曲就相当于分离的平凹透镜、平凸透镜组的场曲,通过调节两个表面的曲率半径可以消除场曲。在本设计中,通过使用多个弯月透镜来校正场曲。同时,弯月形厚透镜的使用有利于增大数值孔径^[15],但会引入严重的球差和色差,球差可以通过其他镜组产生异号球差来补偿,而色差可以由双胶合镜组校正。

可见光波段平场复消色差显微物镜大都采用三胶合结构来校正二级光谱,但这种结构会引入过大的加工和装调误差且本身稳定性差,在该设计中使用双胶合镜组来校正二级光谱。以下公式中, $\lambda_1 = 815 \text{ mm}$ 、 $\lambda_2 = 800 \text{ mm}$ 、 $\lambda_3 = 785 \text{ mm}$ 。对于双胶合透镜组,根据第一色差和数的表达式^[16]:

$$S_{1C} = -n' u'^2 \Delta L'_{FC} = \sum h^2 C \quad (6)$$

式中: $C = \sum \frac{\varphi_i}{v_i}$,在以 λ_2 为中心波长,对 λ_1 、 λ_3 波长消色差的前提下,该系统的二级光谱色差可以表示为:

$$L'_{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} = \frac{l'^2}{f'} \frac{P_2 - P_1}{v_2 - v_1} \quad (7)$$

式中: $P = \frac{(n_{\lambda_3} - n_{\lambda_2})}{(n_{\lambda_3} - n_{\lambda_1})}$, $v = \frac{n_{\lambda_2} - 1}{(n_{\lambda_3} - n_{\lambda_1})}$ 。由上式可知,要消除二级光谱色差,必须使用 P 相等而 v 不相等的两种玻璃。但对一般玻璃, P 近似与 v 成比例, P 相等则 v 近似相等。因此,在可见光显微物镜中校正二级光谱色差通常需要采用特殊的光学材料,最常用的是萤石(CaF_2),它和一般的重冕玻璃(ZK)有相同的 P 值,同时又有足够的 v 值差和 n 值差。表 2 所示为 SCHOTT 玻璃库提供的 CaF_2 和 KZFS7 两种光学玻璃在 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 波长的色散特性。这两种玻璃的 P 值差为 0.003, v 值差为 807,非常符合复消色差条件。但萤石的工艺性和化学稳定性都比较差,同时晶体内部有应力,且价格高昂,所以在该设计中不采用以

上组合,而使用 CDGM 玻璃库提供的 H-FK71 和 TF3 玻璃胶合复消色差,表 3 所示为这两种玻璃在 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 波长的色散特性。这两种玻璃的 P 值差为 0.005, v 值差为 617.2,符合复消色差的条件。

表 2 CaF_2 和 KZFS7 的色散特性

Tab.2 Dispersion characteristics of CaF_2 and KZFS7

Materials	CaF_2	KZFS7
n_{λ_1}	1.430 383	1.667 375
n_{λ_2}	1.430 536	1.667 949
n_{λ_3}	1.430 696	1.668 550
v	1 375.5	568.5
P	0.511 2	0.511 5

表 3 H-FK71 和 TF3 的色散特性

Tab.3 Dispersion characteristics of H-FK71 and TF3

Materials	H-FK71	TF3
n_{λ_1}	1.452 591	1.602 673
n_{λ_2}	1.452 768	1.603 139
n_{λ_3}	1.452 953	1.603 625
v	1 250.7	633.5
P	0.511 0	0.510 5

2 设计结果

2.1 光学系统结构

通过以上分析并参考光学设计手册和国内外专利,拟定了系统的初始结构,导入光学设计软件 Code V 后,设置正透镜的边缘厚度和负透镜的中心厚度以及透镜表面的入射角和折射角为约束条件^[17]。优化得到由 11 片透镜组成,总长度为 49.3 mm,工作距离为 0.23 mm 的显微物镜,具体结构如图 1 所示。第 7~11 片透镜主要用于校正匹兹凡场曲并初步校正球差,整体具有正光焦度;第 3~6 片透镜是两组由 H-FK71 和 TF3 构成的胶合镜组,主要用于校正二级光谱色差,并校正球差,整体具有正光焦度;第 1 和第 2 片透镜构成的双胶合结构用于校正残余像差,整体具有负光焦度。系统最大通光孔径约为 13 mm。

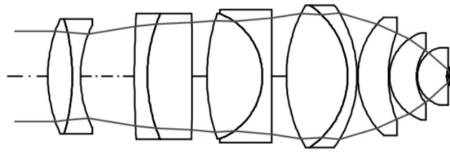


图 1 光学系统结构图

Fig.1 Structure of optical system

2.2 光学系统分析

该光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图 2 所示,截止频率约为 2 280 cycles/mm,最上方的黑色虚线表示衍射极限。从图中可以看出,全视场弧矢方向的 MTF 接近衍射极限,子午方向除边缘视场外,各视场的 MTF 也接近衍射极限,在 1 000 cycles/mm 全视场 MTF 大于 0.3,且全视场波像差小于 0.08λ。

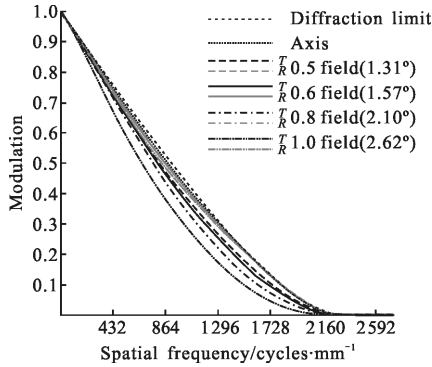


图 2 MTF 曲线

Fig.2 MTF curves

对于显微物镜,焦深可以表示为^[16]:

$$\Delta = \frac{\lambda}{n' \sin^2 U'} \quad (8)$$

式中:λ 为中心波长,该设计中为 800 nm;n' 为像方介质折射率。该设计为干式显微物镜,所以取 1, sinU'=NA=0.9。以上数值代入公式中可求得焦深为 0.988 μm。初级球差的公差可以表示为:

$$\delta L'_m \leq 4\Delta = 3.952 \mu\text{m} \quad (9)$$

剩余球差的公差可以表示为:

$$\delta L'_{sn} \leq 6\Delta = 5.928 \mu\text{m} \quad (10)$$

图 3 所示为系统的色球差曲线,可知离焦量为 0.145 μm,远小于焦深的 1/2; δL'_m 为 0.57 μm, δL'_{sn} 为 0.029 μm,均远小于公差,可知球差已经校正地足够好。初级色差的公差可以表示为:

$$\delta L'_{\lambda 3\lambda 1} = \Delta L'_{\lambda 3\lambda 1m} - \Delta L'_{\lambda 3\lambda 1} \leq 4\Delta = 3.952 \mu\text{m} \quad (11)$$

由图 4 可得,ΔL'_{\lambda 3\lambda 1m} 为 0.088 μm,ΔL'_{\lambda 3\lambda 1} 为 -0.671 μm, δL'_{\lambda 3\lambda 1} 等于 0.759 μm,远小于公差。二级光谱色差的

公差可以表示为:

$$\Delta L'_{\lambda 3\lambda 1\lambda 2} \leq \Delta = 0.988 \mu\text{m} \quad (12)$$

由图 3 可得:

$$\Delta L'_{\lambda 3\lambda 1\lambda 2} = \frac{1}{2} (\delta L'_{\lambda 3} + \delta L'_{\lambda 1}) - \delta L'_{\lambda 2} = 0.003 \mu\text{m} \quad (13)$$

远小于公差,可知二级光谱色差得到了很好的校正。

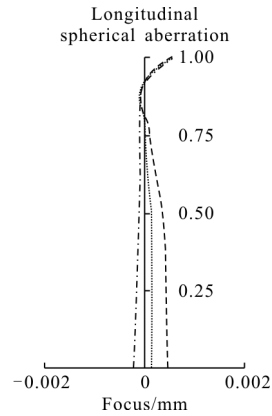


图 3 轴上球差曲线

Fig.3 Longitudinal spherical aberration curves

图 4 所示为系统的场曲和畸变曲线。鉴于缺乏特殊用途的显微物镜平场评价标准,所以该设计参

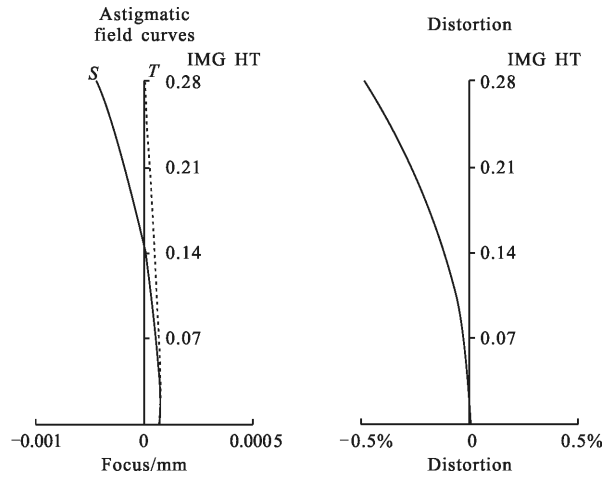


图 4 像散、场曲和畸变曲线

Fig.4 Astigmatic, field curves and distortion curves

考 ISO 在 2013 年制定的用于观测的显微物镜平场标准。该标准规定平场显微物镜必须满足^[18]:

$$\frac{\tau_r + \tau_s}{2} \leq \delta \quad (14)$$

$$\tau_r - \tau_s \leq \delta \quad (15)$$

式中:τ_r 和 τ_s 分别表示像面到子午边缘视场和弧矢边缘视场的距离,该设计中,分别为 0.005 μm 和 -0.444 μm。δ 由 Berek 公式表示:

$$\delta = \frac{\omega}{M} \cdot \frac{250\,000}{NA} + \frac{\lambda}{2NA^2} \quad (16)$$

求得的显微物镜焦深, 其中 ω 为人眼的视角分辨力, 取为 $5'$ (对应 0.0014 rad), M 为显微镜系统总的放大倍率, 其中目镜的放大倍率默认为 $10\times$, λ 为中心波长, NA 为数值孔径, 代入该设计数据可得 $\delta = 1.466\ \mu\text{m}$, 大于由公式(18)求得的焦深 Δ , 所以该设计仍用 $0.988\ \mu\text{m}$ 表示焦深, 代入公式(24)和公式(25), 满足平场条件。从畸变图中可以看出全视场的相对畸变在 0.5% 以内, 符合设计要求。图 5 所示为垂轴像差曲线, 可知垂轴色差校正良好。

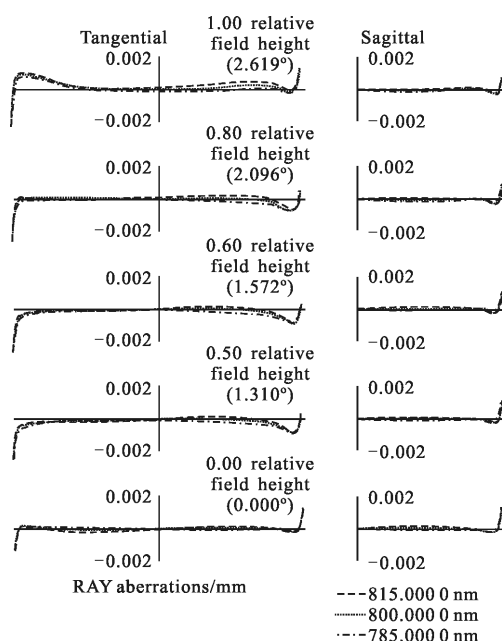


图 5 垂轴像差曲线

Fig.5 Lateral aberration curves

图 6 所示为包围分布能量, 全视场 90% 的能量集中在直径为 $2.11\ \mu\text{m}$ 的包围能量圆中, 能量集中度非常高, 且全视场点列图 RMS 直径小于 $0.59\ \mu\text{m}$ 。

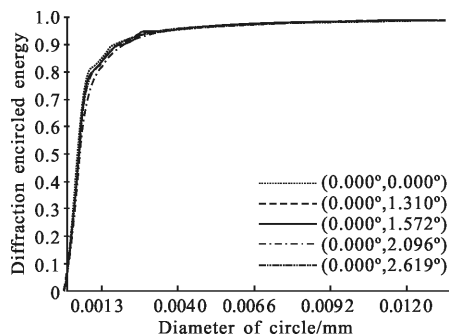


图 6 包围能量分布曲线

Fig.6 Encircled energy distribution curves

2.3 公差分配

光学系统中材料的特性误差、元件的加工和装配误差会导致性能下降。该设计对系统的性能有严格要求, 仅依靠收紧材料公差、加工公差和装调公差会使可制造性变差, 成本上升。选择合理的补偿器, 能够在实现预期性能的同时降低成本^[9]。

按照目前国内加工水平设置初始公差范围。以波像差 RMS 值作为评价指标, 指定每项公差引起的 F5 视场波像差 RMS 值下降量为 0.001λ , 利用波前差分法的反转灵敏度分析生成初始公差^[20]。分析结果表明, 在像面离焦的补偿作用下, 97.7% 的累积概率全视场波像差 RMS 值 $\leq 0.103\lambda$, 此时元件楔形、倾斜、偏心等非对称公差对波像差的影响较大。将各镜组单独径向移动 $5\ \mu\text{m}$, 观察 RMS 波像差的变化。由于胶合镜组不适合做补偿器, 故只考虑将单透镜作为径向补偿器, 得到 RMS 波像差对第 9 片和第 11 片透镜的径向移动较敏感。依次将第 9 片透镜和第 11 片透镜作为径向补偿器, 97.7% 的累积概率全视场波像差 RMS 值 $\leq 0.093\ 1\lambda$, 已接近设计要求。

最后进行手动调整, 放松或加紧部分公差。材料公差、加工公差、装调公差如表 4~6 所示, 补偿器的移动范围如表 7 所示。 97.7% 的累积概率全视场波像差 RMS 值 $\leq 0.088\ 3\lambda$, 如图 7 所示, 满足了设计要求。系统在装调过程中可先将镜组微应力装框, 之后采用中心偏测量仪进行精密定心逐次收敛球心像,

表 4 材料公差

Tab.4 Material tolerances

Items	Value
Refractive index/mm	$5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$
Abbe-number/(°)	0.8% - 1%
Homogeneity/mm	$2 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$

表 5 加工公差 ($\lambda = 546.1\ \text{nm}$)

Tab.5 Manufacturing tolerances ($\lambda = 546.1\ \text{nm}$)

Items	Value
Fringe power/ λ	0.2 - 1
Surface irregularity/ λ	0.08 - 0.3
Central thickness/mm	0.002 - 0.01
Wedge/mm	0.002 - 0.008

表 6 装调公差

Tab.6 Alignment tolerances

Items	Value
Airspace/mm	0.002–0.01
Tilt/rad	0.000 4–0.001
Decenter & Roll/mm	0.002–0.01

表 7 补偿器移动范围

Tab.7 Compensator range

Items	Value/mm
Defocus of image surface	0.011 948
Lens 9 (X direction)	0.049 074
Lens 9 (Y direction)	0.050 050
Lens 11(X direction)	0.012 553
Lens 11(Y direction)	0.012 503

最后用压电陶瓷控制补偿器径向微移动。整个装调过程可利用 ZYGO 干涉仪等实时检测镜组面型和系统波像差^[21-22]。

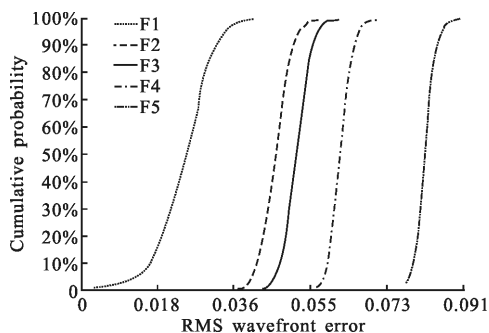


图 7 公差分析曲线

Fig.7 Curves of tolerance analysis

3 结论

针对飞秒激光微纳加工系统对显微物镜大数值孔径、大视场的需求,从初级像差理论出发,设计了一套像方视场为 22.5 mm,数值孔径为 0.9 的无限共轭距显微物镜,使用国产光学材料在 785~815 nm 近红外波段实现了平场复消色差。合理的选用补偿器提升性能和放松公差后,全视场 RMS 波像差小于 0.09λ。该显微物镜可用于搭建飞秒激光微纳加工系统,结合双光子吸收效应,可实现高加工精度、大加工范围的微纳加工。

参考文献:

[1] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices-micromachines can be created with higher resolution using two-photon absorption [J]. *Nature*, 2001, 412(6848): 697–698.

[2] Dong Xianzi, Chen Weiqiang, Zhao Zhensheng, et al. Femtosecond pulse laser two-photon micro-nanofabrication technology and application [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1): 2–13. (in Chinese)
董贤子, 陈卫强, 赵振声, 等. 飞秒脉冲激光双光子微纳加工技术及其应用[J]. 科学通报, 2008, 53(1): 2–13.

[3] Li Yan. The research of femtosecond laser micro-nanofabrication [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
李岩. 飞秒激光微纳加工制备研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.

[4] Kuang Yuguang. Lens design of the flat field, apochromatic CF microscopic objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14 (5): 558–560. (in Chinese)
匡裕光. 平象场复消色差大视场显微物镜光学设计[J]. 光学学报, 1994, 14(5): 558–560.

[5] Chen Jiao, Jiao Mingyin, Chang Weijun, et al. Optical design of apochromatic microscope objective for near ultraviolet-visible wide spectrum [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1098–1102. (in Chinese)
陈皎, 焦明印, 常伟军, 等. 近紫外-可见光宽波段复消色差显微物镜设计[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1098–1102.

[6] 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. (in Chinese)
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.

[7] Miks A, Novak J. Method for primary design of superachromats [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (28): 6668–6876.

[8] Liu Qian, Yang Weichuan, Yuan Daocheng, et al. Design of linear dispersive objective for chromatic confocal microscope [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21 (10): 2473–2479. (in Chinese)
刘乾, 杨维川, 袁道成, 等. 光谱共焦显微镜的线性色散物镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2473–2479.

[9] Meng Qingyu, Dong Jihong, Wang Dong, et al. Minitype optical system development of stereo camera [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0418002. (in Chinese)
孟庆宇, 董吉洪, 王栋, 等. 轻小型立体相机光学系统研制[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418002.
- [10] Li Lin. Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
李林. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
- [11] Liu Lipeng. The research of 3D micro-fabrication with two-photon absorption of femtosecond laser and ultrafast detection technology [D]. Nanjing: Jiangsu University, 2005. (in Chinese)
刘立鹏. 飞秒激光双光子三维微细加工和超快检测技术的研究[D]. 南京: 江苏大学, 2005.
- [12] Wang Zhijiang. Handbook of Practical Optical Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
王之江. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [13] Cui Guihua. Design of plan field, apochromatic microscope objective and optical tolerances computation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1987. (in Chinese)
崔桂华. 平场复消色差显微物镜设计和光学公差计算[D]. 北京: 北京理工大学, 1987.
- [14] Li Lin. Modern Optical Design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
李林. 现代光学设计方法 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [15] Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [16] Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [17] Li Shixian, Li Lin. Handbook of Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
李士贤, 李林. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [18] International standard ISO 19012 -1 -2013, Microscopes-Designation of microscope objectives [S]. 2013.
- [19] Xu Weicai. Optical design and imaging performance compensation for the lithographic lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- [20] Fu Yuanying, Li Yanqiu, Liu Xiaolin, et al. A method of tolerance analysis for wavefront error of lithographic projection lens [J]. *Optical Technique*, 2014, 40 (4): 289-294. (in Chinese)
符媛英, 李艳秋, 刘晓林, 等. 投影光刻物镜波像差的公差分析方法[J]. 光学技术, 2014, 40(4): 289-294.
- [21] Guo Xiarui, Wang Chunyu, Liao Zhibo, et al. Misalignment and assemblage stress analysis in space transmission optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (4), 947-951. (in Chinese)
郭夏锐, 王春雨, 廖志波, 等. 高精度透射式空间光学系统装调误差分析与动态控制 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (4): 947-951.
- [22] Li Mengjuan, Liao Zhibo, Wang Chunyu. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refractive optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 277-281. (in Chinese)
栗孟娟, 廖志波, 王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 277-281.