

激光与光电子学进展

大视场大数值孔径显微物镜光学设计

黄木旺^{1,2}, 刘旭^{1*}, 林法官²¹浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;²福建福特科光电股份有限公司, 福建 福州 350100

摘要 在纳米激光直写加工系统中, 显微物镜是其中的关键部件, 行业发展的趋势是在大数值孔径(NA)下具有更大的物方视场, 并且能适应双光子聚合(Two-photon polymerization, TPP)胶折射率的变化。对比当前 TPP 效应研究用显微物镜的指标, 挖掘了物方视场、NA 和镜片数的关系, 并提出物镜的合成敏感度指标(Synthetic sensitivity index, I_{ss})。结合 I_{ss} 设计了一款波段为 500~800 nm、NA 大于 1.3、物方视场为 1.0 mm 的显微物镜。该物镜的设计结果为, 调制传递函数曲线接近衍射极限, 波像差均方根小于 0.07λ , 以内调焦方式来适应 TPP 胶折射率的变化。公差分析表明该设计结果具有可行性。

关键词 光学设计; 大视场; 大数值孔径; 平场复消色差显微物镜; 激光直写; 微纳加工

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220458

Design of Large Field of View and High Numerical Aperture Microscope Objective

Huang Muwang^{1,2}, Liu Xu^{1*}, Lin Faguan²¹College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;²Foetek Photonics, Inc., Fuzhou 350100, Fujian, China

Abstract The microscope objective is the key component of the nano-laser direct writing processing system, and the development trend in industry involves a large object-side field of view under a large numerical aperture (NA) and adapting to the change of the refractive index of the photoresist for two-photon polymerization (TPP). This paper compares the indicators of the microscope objective used in current TPP effect research, excavates the relationship between the object-side field of view, NA, and number of lenses, and proposes the objective synthetic sensitivity index (I_{ss}). Combined with the I_{ss} , a microscope objective with a wavelength range of 500–800 nm, $NA > 1.3$, and an object-side field of view of 1.0 mm is designed. The resultant design of the objective lens involves a modulation transfer function curve close to the diffraction limit and a root mean square of wave aberration less than 0.07λ and uses the internal focusing method to adapt to the change of photoresist refraction for TPP. Tolerance analysis demonstrates that the design results are feasible.

Key words optical design; large field of view; large numerical aperture; flat-field achromatic microscope objective; laser writing; micro-nanofabrication

1 引言

飞秒(10^{-15} s)脉冲激光双光子微纳加工技术^[1-5]是利用双光子聚合(Two-photon polymerization, TPP)效应实现的具有纳米级三维(3D)分辨率、非接触式增材制造技术, 俗称微纳 3D 打印技术。TPP 材料或 TPP 胶是在普通光敏固化材料中添加少量的高灵敏度双光子引发剂得到的。TPP 效应, 即利用 TPP 材料分子一次吸收两个光子, 各光子能量约为分子基态和激发态能量差的一半, 从而使液态材料发生聚合而固

化, 而激发光需要足够高的光子密度^[6]。在研究 TPP 效应时, 国内外科研机构和高校使用两种方式: 1) 大多数采用 $20\times$ 、 $60\times$ 、 $100\times$ 等商用油浸显微物镜, 少数自研专用显微物镜, 再配合其他部件搭建系统; 2) 购买商用的设备。其中, 大数值孔径(NA)显微物镜可实现高度聚焦光线, 是此系统的关键器件之一。

本文对国内外研究 TPP 效应时采用的显微物镜指标进行对比; 依据所需要指标, 提出显微物镜的设计难度系数(D), 以此预测物镜所需的镜片数, 并提出衡量物镜敏感度的合成敏感度指标(Synthetic sensitivity

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-01-14; 录用日期: 2022-01-20; 网络首发日期: 2022-01-30

通信作者: liuxu@zju.edu.cn

index, I_{ss});选择合适的结构和材料,利用成像设计软件 CODE V 并结合 I_{ss} 指标,进行像质和敏感度优化;最终得到了一款无限远校正类型、波段在 500~800 nm、物方视场直径达 1.0 mm、NA 为 1.316、内对焦式大视场大数值孔径的平场复消色差显微物镜,并对其进行了公差分析。

2 设计过程

2.1 物镜规格对比

国际先进 TPP 设备厂家^[7](如德国 Nanoscribe 公司)和自行搭建 TPP 系统^[8]的物镜参数汇总见表 1,长度单位均默认为 mm。

表 1 物镜规格对照
Table 1 Objective specification comparison

Parameter	Nanoscribe	Olympus	ZEISS	Our project
NA	1.4	0.8	1.3	1.3
Mag.	63×	25×	100×	100×
W. D.	0.36	0.38	0.2	0.5
F. D.	0.28	0.7	0.265	1.00
C. G.	—	—	0.17	—
nd	1.515	1.515	1.515	1.522
vd	—	—	40.8	34.1

表 1 中,nd、vd 是指浸润材料的折射率和阿贝数, Mag. 表示放大倍率,W. D. 表示工作距离,F. D. 表示物方视场直径,C. G. 表示盖玻片厚度,盖玻片用肖特 D263。浸润材料(TPP 胶或浸油)和盖玻片均为物镜的物方工作介质。德国 Nanoscribe 公司采用蔡司的通用物镜,未用 100× 的物镜。从理论和使用上,发现在 TPP 效应研究中大 NA、大倍率物镜要表现出应有的性能,则要求物镜在设计时严格匹配浸润材料的光学参数(折射率和阿贝数)。当调整 TPP 胶成分时,主要引起其折射率的较小变化,系统应具有调节功能以避免性能下降,比如物镜使用内对焦方式。

2.2 主要设计规格

物镜规格见表 2。

在满足平场和复消色差前提下,全视场波像差均

表 2 物镜设计规格
Table 2 Objective design specs

Parameter	Spec
Spectral range /nm	532~780
Objective field number	1.0
Numerical aperture	≥1.3
Working distance	≥0.5
Total length	<250
RMS of wavefront error /λ	0.09
Distortion /%	<0.5

方根(Root mean square, RMS)应接近 Marechal 判据^[9],即 $\lambda/14$ 。在 100 倍率和 NA 为 1.3 条件下,物方视场直径由常规的不到 0.3 mm 提高至 1.0 mm,工作距离也加大到 0.5 mm。在这种超常规的物镜要求下,为预测作为重要设计参数之一的镜片数量,对物镜规格和镜片数量关系进行了分析。从文献[10]中选取了相同像方视场直径下 4 种倍率的物镜进行比较,相关参数见表 3。

表 3 各种倍率显微物镜规格对照
Table 3 Comparison of various microscope objectives

Magnification	NA	Number of lens	$NA \cdot y$	$(NA)^2 \cdot y$
10×	0.22	4	0.176	0.039
20×	0.49	5	0.196	0.096
47.5×	0.91	7	0.153	0.139
98×	1.28	7	0.104	0.134

表 3 中, y 为物方视场半径,其数值等于像方视场半径 8 mm 除以倍率。因物镜的浸油对提高 NA 有重要作用,也计为一枚镜片。一般用拉赫不变量 $J = NA \cdot y$ 来衡量光学系统的设计难度^[11]。从表 3 的 47.5× 和 98× 的镜片数来看,两者设计难度相差不多,但 J 数值相差较多。

考虑到光学系统的通光量与 NA 值的平方成正比以及表 3 的数据,可知用物镜设计难度系数 $D = (NA)^2 \cdot y$ 进行衡量更好。 D 指标数值每增加 0.04,镜片数大约增加 1 枚。待设计物镜的 D 值为 $1.3^2 \times 1.0/2 = 0.845$,数值比常规 98× 物镜的增加了 0.711,为后者的 6.3 倍,至少要增加 18 枚镜片,即镜片总数不低于 25,但内调焦方式等因素会导致镜片数增加。

2.3 物镜敏感度指标

对大 NA 物镜而言,由误差所造成的实际系统性能衰减比较严重。因此,优化该类系统的敏感度尤为重要。显微镜物镜属于小视场角、大孔径类型系统,其中球差和彗差影响较大。其次,孔径边缘光线的入射角超过 30° 后容易引起系统敏感^[12]。因此,综合以上三点因素,提出并采用单一数值的合成敏感度指标 I_{ss} 来衡量,以方便分析和优化系统的敏感度:

$$I_{ss} = \sqrt{\sum_{i=1}^L \frac{A_i}{30} (S_i^2 + T_i^2)}, \quad (1)$$

式中: A_i 为第 i 个表面上的孔径边缘光线的入射角, S_i 为第 i 个表面上的初级球差, T_i 为第 i 个表面上的初级彗差, L 为最后一个表面的编号。由以往设计及量产经验可知:在保证性能和敏感度前提下, $NA > 0.4$ 系统, I_{ss} 数值应控制在 1.6 以内; $0.15 < NA < 0.3$ 系统, I_{ss} 数值应控制在 1.3 以内。因此,本物镜方案优化后 I_{ss} 应该控制在 1.6 以内。

2.4 系统初始结构

获取镜头初始结构数据有两种方式:1)利用薄透

镜初级像差理论进行变量替换后计算得到,比如源自德国蔡司公司的兰格变量替代法(PWC法)和日本佳能公司的松居变量替代法(ABC法);2)查阅及使用国内外的专利、数据手册、本单位以往设计的数据,甚至拆解类似品逆向所得数据。前者所得结果^[13-19]不一定合适,不能保证其敏感度低,也一样要借助设计者的理论水平、经验和直觉,结合实际的加工和装调能力,经

过软件精细调整优化达到规格要求。而后者可借助成熟的方案,更加直接快捷,本文将使用后种方式。

查阅大量专利和镜头数据手册,发现NA超过1.0的无限远校正的物镜,大多由部分复杂化双高斯结构,加上物方端齐明透镜形式构成^[20-21]。选定图1所示的形式为初始结构,共计20枚镜片,含1枚三胶合镜片。初始系统的 I_{ss} 数值较大,为5.356。

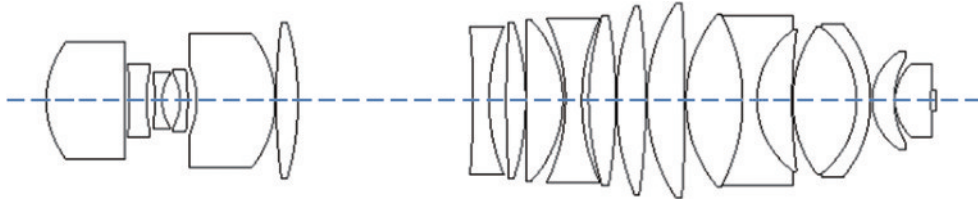


图1 初始系统结构

Fig. 1 Initial system structure

3 设计结果

3.1 结果汇总

借助CODE V软件^[22]进行优化,在适当的位置增加镜片来提高性能,在性能评估函数中使用 I_{ss} 来降低系统敏感度,并结合加工和装调因素,最终优化得到符合设计要求的物镜,其参数见表4。

表4 设计好的物镜参数

Table 4 Specs of designed objective

Parameter	Spec
Spectral range /nm	532-780
Effective focal length	7.5
Half field of view /($^{\circ}$)	4.2
Objective field number	1.0
Numerical aperture	1.316
Working distance	0.5
Total length	231.1
RMS of wavefront error / λ	0.05
Distortion /%	0.21
Number lens element	27

从表4可见,设计后的各项指标,都达到了规格,且镜片数量与原来预测的接近,该物镜结构如图2所示。

当TPP胶折射率分别为1.522、1.520和1.527时, I_{ss} 数值分别1.374、1.372和1.378,相对初始状态,

敏感度都得到大幅下降。

本系统可在NA=1.3规格下,使用内对焦方案兼容TPP胶的折射率变化(-0.002~+0.005)。内对焦即在其前后透镜组不动,移动其镜组,以此适应物方介质折射率变化。当TPP胶折射率往1.520变化时,内对焦透镜组朝物方移动;当TPP胶折射率往1.527变化时,朝像方移动。图3为光学系统在TPP胶折射率为1.522时的调制传递函数(MTF)曲线,接近衍射极限,在其折射率为1.520和1.527时曲线也基本一致。

3.2 公差分配

对大NA、大视场显微物镜而言,制造中导致系统性能下降的误差类型有玻璃折射率偏差、元件的加工公差及装配公差两大类。由于系统对玻璃折射率公差要求高且难以补偿,已大大超出常规的 $\pm 3 \times 10^{-4}$ 标准。在制造中,先买材料实测F、e、d、C、r及s这6条夫琅禾费谱线的折射率,再代入实测数据进行微调后才结束设计工作。

在软件公差分析方面进行如下设置:1)材料的折射率测量误差为 $\pm 5 \times 10^{-5} \sim \pm 1 \times 10^{-5}$,均匀性为 $\pm 2 \times 10^{-6} \sim \pm 5 \times 10^{-6}$;2)镜片加工公差为2~3个光圈,局部光圈为0.3,中心厚度误差为0.005~0.010 mm,倾斜误差为20~40''。

通过公差灵敏度分析,系统的装调公差分配见表5。在公差分配过程中,除了通过调整间隔来补偿加工和装调误差以外,还对特定镜片进行偏心调整以便补偿系统的偏心误差^[23-25],通过分析可知,系统中

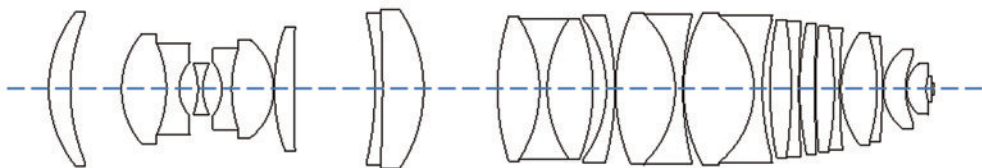


图2 设计结果

Fig. 2 Final design result

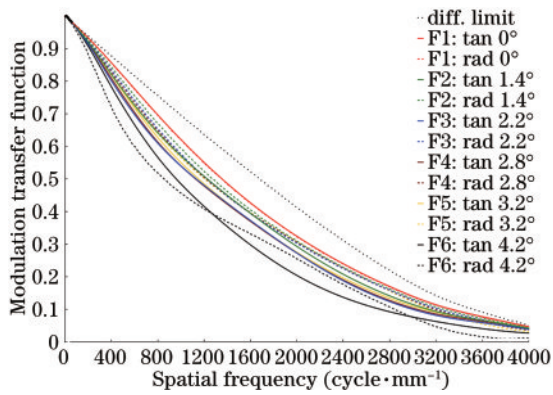


图 3 MTF 曲线
Fig. 3 MTF curve

表 5 装调公差

Table 5 Alignment tolerances

Item	Value
Airspce	0.005-0.01
Tilt /rad	0.00007-0.00029
Decenter	0.003-0.01

Lens 13 和 Lens 25 适合作为偏心补偿器的特定镜片, 补偿范围计算结果见表 6。

表 6 补偿器移动范围

Table 6 Compensator range

Item	Value
Defocus of image surface	0.001
Lens 13 (X direction)	0.0105
Lens 13 (Y direction)	0.0175
Lens 25 (X direction)	0.0434
Lens 25 (Y direction)	0.0505

在本设计方案未应用 I_{ss} 之前, 由公差灵敏度分析得知, 个别镜片的偏心装配公差要求小于 0.001 mm, 这实现起来很困难。波像差 RMS 公差分析结果如图 4 所示, 在 80% 概率内除了最外视场 F5 稍差些, 各视场波像差 RMS 基本在 0.09λ 以内, 说明本设计可得到满足规格的实物。

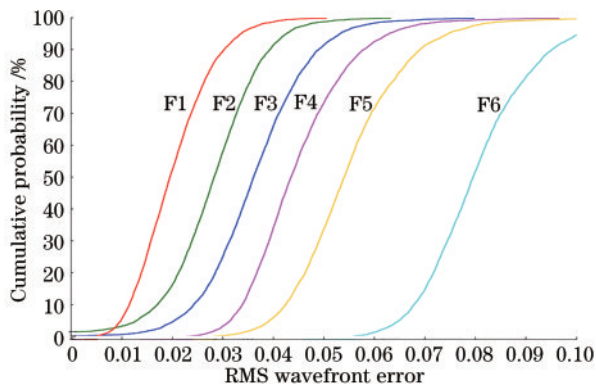


图 4 波前公差分析曲线

Fig. 4 Wavefront tolerance analysis curve

4 结 论

研究了显微物镜的物方视场直径、NA 值与镜片数量的关系, 得到其设计难度指标 D , 并提出了物镜的敏感度指标 I_{ss} ; 在使用 CODE V 优化的同时, 结合 I_{ss} 指标降低了公差敏感度。设计得到了一款物方视场直径 1.0 mm、NA=1.316 的平场复消色差物镜。该物镜的复消色差波段为双光子工作波段 500~800 nm, 系统总长度为 231.1 mm。各项性能指标表明光学系统像质接近衍射极限, 能满足总体指标要求。为适应 TPP 胶折射率的波动, 采用内对焦方式。最终的公差分析结果表明此方案具有可行性。

参 考 文 献

- [1] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices[J]. Nature, 2001, 412(6848): 697-698.
- [2] 王荣荣, 张维彩, 金峰, 等. 双光子聚合制备聚苯胺微结构[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202006.
Wang R R, Zhang W C, Jin F, et al. Fabrication of polyaniline microstructure via two-photon polymerization [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202006.
- [3] 杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500005.
Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500005.
- [4] 王卫京, 周新颖, 刘文军. 利用飞秒激光烧蚀加工金属掩模板[J]. 科技信息(科学教研), 2007(21): 148-150.
Wang W J, Zhou X Y, Liu W J. Machining metal mask plate by femtosecond laser ablation[J]. Science & Technology Information, 2007(21): 148-150.
- [5] 巫殷忠, 黄燕华, 尹强, 等. 高厚度薄膜-泡沫平面调制靶的飞秒激光微加工[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 685-688.
Wu Y Z, Huang Y H, Yin Q, et al. Thick modulated planar film-foam target fabricated by femtosecond laser micromachining[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 685-688.
- [6] 宋晓艳, 邢金峰. 双光子聚合 3D 打印[J]. 化工学报, 2015, 66(9): 3324-3332.
Song X Y, Xing J F. 3D printing technology based on two-photon polymerization[J]. CIESC Journal, 2015, 66(9): 3324-3332.
- [7] Gissibl T, Thiele S, Herkommer A, et al. Two-photon direct laser writing of ultracompact multi-lens objectives [J]. Nature Photonics, 2016, 10(8): 554-560.
- [8] Chung T T, Tu Y T, Hsueh Y H, et al. Micro-lens array fabrication by two photon polymerization technology [J]. International Journal of Automation and Smart Technology, 2013, 3(2): 131-135.
- [9] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

- Wang Z J. Handbook of practical optical technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [10] Laikin M. Lens design[M]. 3rd ed. New York: Dekker, 2001.
- [11] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [12] 草川徹. レンズ光学—理論と実用プログラム[M]. 東京: 東海大学出版会, 1988.
Toru K. Lens Optics-theory and practical program[M]. Tokyo: Tokai University Press, 1988.
- [13] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
Li L. Modern optical design method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
- [14] 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): 0718006.
Zhou E Y, Liu L H, Liu Y, et al. Design of high NA flat-field microscope objective for near infrared[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 0718006.
- [15] 肖倩. 生物显微镜变倍物镜的光学设计[J]. 光学仪器, 2007, 29(2): 78-81.
Xiao Q. Optical design of biological zoom microscope objective[J]. Optical Instruments, 2007, 29(2): 78-81.
- [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 Z Y, Zhang X T, Wu Q Q. High resolution ultraviolet/visible wide band microscope objective[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 575-578.
- [17] 毛文炜. 现代光学镜头设计方法与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Mao W W. Modern optical lens design: methods and examples[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [18] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
Yuan X C. Optical design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.
- [19] 近藤文雄. レンズの設計技法[M]. 東京: 光学工業技術研究組合, 1978.
Fumio K. Lens design techniques[M]. Tokyo: Optical Industry Technology Research Association, 1978.
- [20] Kurvits J A, Jiang M M, Zia R. Comparative analysis of imaging configurations and objectives for Fourier microscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(11): 2082-2092.
- [21] 帕诺夫, 安特列耶夫. 显微镜的光学设计与计算[M]. 包学诚, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.
Панов В А, Андреев Л Н. Optical design and calculation of microscope[M]. Bao X C, Transl. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [22] 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.
Yu X H. Design of flat-field achromatic objective lens with wide spectrum and large numerical aperture[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [24] 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.
Xue J L, Gong Y, Li D M. Optical design of the N. A. 0.75 plan-apochromatic microscope objective[J]. Chinese Optics, 2015, 8(6): 957-963.
- [25] 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.
Xu W C. 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.