材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250326003

# 消色差超透镜设计及双光子聚合加工

王洪波，蒋　强*，黄玲玲
（北京理工大学 光电学院，北京 100081）

**摘　要：** 为扩展超透镜的设计自由度，实现多功能的超透镜，并降低超表面器件的设计难度，提出一种基于梯度下降优化的超透镜逆向方法。结合反向传播算法求解梯度信息，实现了偏振不敏感的基于单层结构的消色差多阶超透镜设计。利用双光子聚合3D打印技术，对加工工艺进行探索，实现了打印横向分辨率达到200 nm的超透镜加工。实验测量到所加工的超透镜的焦距和设计值偏离小于3%。对比其他报道，该研究结合了逆向设计方法的设计灵活性和双光子聚合3D打印方法的三维加工优势，为超表面的高自由度设计和加工提供了新的思路，不仅充分发挥了超表面的光场调控优势，还推进了其工程应用。

**关键词：** 超透镜；逆向设计；双光子聚合
**中图分类号：** TN256；O436　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0478－06

## Achromatic Metalens Design and Two-photon Polymerization Processing

WANG Hongbo, JIANG Qiang, HUANG Lingling
(**School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN**)

**Abstract:** To expand the design freedom of metalenses, realize multifunctional metalenses, and reduce the design difficulty of metasurface devices, an inverse method based on gradient-descent optimization is proposed. Combined with the backpropagation algorithm to solve the gradient information, the polarization-insensitive achromatic metalens design based on a single-layer structure is realized. Using two-photon polymerization three-dimensional (3D) printing technology, the processing technology was investigated, and a metalens with a lateral resolution of 200 nm was processed. Experimental results revealed that the focal length of the processed metalens deviated from the design value by less than 3%. Compared with other studies, this study combines the design flexibility of the inverse design method with the 3D processing advantages of the two-photon polymerization 3D printing method. As such, a new solution for designing and processing high-degree-of-freedom metasurfaces is provided by fully exploiting the advantages of light field control of metasurfaces, thereby promoting the engineering application of metasurfaces.

**Key words:** metalens; inverse design; two-photon polymerization

## 0　引言

传统的折射透镜通过优化表面曲率和材料厚度来控制光线的会聚和发散，往往具有较大的尺寸和重量，这限制了其在小型化光学系统中的应用。近年来，超表面技术受到广泛关注。作为一种颠覆性光学新材料，超表面是由人为设计的亚波长结构单元组成的二维平面结构[1]，具有微米级的厚度，通

**收稿日期：**2025－03－26.
**基金项目：**国家自然科学基金项目(62005017)；北京理工大学朗月计划(LY2024-10).
* **通信作者：**蒋　强

过优化超原子的形状和排布方式，可以实现对光波振幅、相位、光谱、偏振等多个参量的灵活调控，目前已经被用于设计超透镜[2-3]、超表面全息[4-6]、光束发生器[7-8]等多种功能器件。

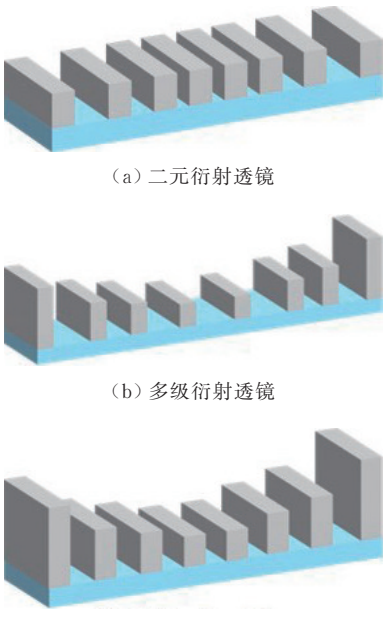
相比折射透镜，超透镜在尺寸和重量上具有显著优势，其可以在系统小型化和集成化中发挥重要作用。而且超表面也被认为是光学元件发展中的颠覆性技术，其价值与潜力也备受关注[9-10]。目前对超透镜的设计大多采用正向设计的方法[11]，该方法既需要通过耗时和耗内存的超原子几何参数扫描来构建响应数据库，又需要构建物理模型以获得目标光学元件的相位信息，这极大地限制了超表面技术的发展应用。为克服超表面设计过程中结构自由度有限、设计耗时耗内存以及设计门槛高等问题，提出逆向设计方法并用于超表面器件的高效率设计。其中，梯度下降算法是一种被广泛应用的逆向设计方法，其利用目标函数对变量的梯度信息来实现对目标的快速迭代逼近。基于梯度的拓扑优化算法已被广泛应用于各种超表面器件的设计。如Ha等利用拓扑优化逆向设计了自由形状的片上超透镜[12]，实现了高缩放比波导的高效光互联，传输效率远高于传统锥形波导。Choi等利用拓扑优化逆向设计了同高度的同心圆环结构的RGB消色差超透镜[13]，对同一列的网格进行材料密度平均，使设计的结构具有加工可行性。而对于梯度难以求解或不确定的问题，一般可采用遗传算法或粒子群算法，如Zu等将拓扑优化和离散粒子群优化结合，优化了高度可变的同心圆环结构的超透镜[14]，离散粒子群优化使得结构高度分布也得到了优化，进一步扩展了优化的自由度，实现了扩展焦深和消色差功能。Zou等用粒子群算法逆向设计了彩色路由功能的单层超表面[15]，将入射白光按波长路由到不同像素，比传统滤波方法具有更高的光能利用率。

对超表面器件的高精度加工，通常采用电子束曝光结合刻蚀的方法。虽然该方法可以实现低至10 nm量级的最小特征尺寸，但其难以实现变高度结构的高精度加工，导致逆向设计的准三维结构无法被加工实现并进行实验验证。双光子聚合技术（TPP）是一种基于双光子吸收效应的先进微纳加工方法，利用飞秒激光在焦点处触发光敏材料非线性光聚合反应，实现高精度的三维结构制造。其克服了传统光刻技术对掩模和逐层堆叠的依赖，且加工过程无需接触或刻蚀，大幅简化工艺流程。该技术目前被研究应用于光子晶体、微光学元件、超表面等微纳光学器件的制备[16-17]。

本文基于梯度下降提出一种基于反向传播算法的超透镜逆向设计方法。该方法通过引入结构高度这一自由度，实现了聚焦功能的超透镜逆向设计，进一步逆向设计了在可见光波段具有消色差功能的单层超透镜。通过对双光子聚合激光直写工艺参数的优化，实现了低至200 nm宽度的环带加工，加工制备出了环带高度可变的消色差超透镜，并对消色差聚焦进行了实验验证和结果分析。

## 1　基于梯度下降的多阶超透镜优化

多阶衍射透镜是一种纯相位的衍射光学元件[18-19]，通过去除理想透镜的2π冗余相位并离散成多阶相位结构，可以实现和连续相位接近的效果，并保持较高的效率，具有体积小、重量轻的优点。二元衍射透镜和多阶衍射透镜都由同心环带结构组成，通过调制光场相位实现聚焦，其一维结构如图1所示。环带的位置、宽度和高度作为设计参数，不同环带之间相互干涉使入射光会聚在焦点位置。相比于高度不变的二元衍射透镜，多阶衍射透镜将相位离散成多阶，具有更高的衍射效率，可以实现折射透镜难以实现的功能，如宽带[20]、长焦深[21-22]、大视场等。所设计的多阶超透镜如图1(c)所示，相



(a) 二元衍射透镜

(b) 多级衍射透镜

(c) 多阶超透镜

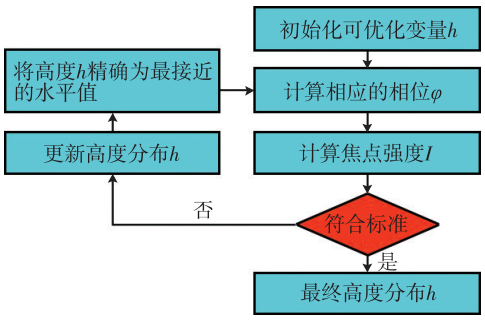
图1　多阶相位透镜结构示意图

比于多阶衍射透镜，其环带宽度达到深度亚波长量级，为200 nm。此外，衍射透镜的采样周期在面内不同区域是变化的，这会导致在设计上整个透镜口径未能得到有效利用。由于欠采样，较大的采样周期还可能限制透镜的数值孔径[23]，而本设计中的多阶超透镜在面内不同位置处，采样周期是固定的。更小的采样周期使得可优化的参数空间更大，从而不会存在因采样不足引起的数值孔径受限的问题。

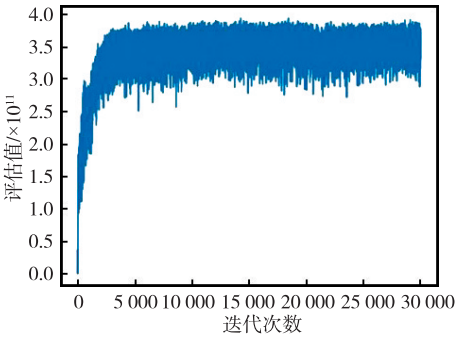
梯度下降算法是一种局部优化算法，通过求解评价函数关于可优化变量的梯度，沿着梯度方向更新变量，使优化朝着评价函数最小的方向进行。准确计算梯度是使优化朝着正确方向进行的关键，可以采用反向传播算法或伴随法进行梯度计算。

反向传播算法[24]通过链式法则计算评价函数关于优化变量的梯度，如果整个正向过程是完全可微的，则可以通过链式法则计算评价函数关于任何中间变量和自变量的梯度。在本设计中，仅考虑环带的相位调制作用，采样周期200 nm相比整个超透镜口径足够小，可以将每个环带视为一个子波源，利用点源法计算各个环带相互干涉的作用。整个模型被简化为两部分，一部分是环带高度和相位的映射，另一部分是点源法计算所有环带相位干涉的结果。两个过程都是可微过程，因此可以采用反向传播算法快速计算梯度。具体来说，利用Pytorch对超透镜的正向传播过程进行建模，实现多阶超透镜的逆向设计。考虑到透镜具有旋转对称性，可以将二维超透镜的优化简化为沿径向的一维参数优化，只需要优化一维结构的高度分布即可，从而大大减少计算量。算法流程如图2(a)所示，首先对一维高度分布初始化。初始高度可以是随机分布，也可以是均匀分布。根据光程累积原理计算结构对应的相位$\varphi$，并使用点源法计算出相应的焦点强度$I$，如果没有达到一定强度，则根据反向传播计算的梯度更新高度分布，并离散到最近的阶数，重新计算焦点强度，直到满足收敛条件。由于在每轮迭代都引入了高度离散化限制，评价函数曲线在振荡中上升，如图2(b)所示。

首先对单波长超透镜进行优化以验证算法的有效性。设置超透镜的半径为67.5 μm，工作波长为465 nm，焦距为120 μm，对应的数值孔径为0.5，将环带宽度设为200 nm，选用材料为IP-Dip2光刻胶，其折射率设定为1.52。根据公式(1)可知，环带




(a) 多阶超透镜逆向设计算法流程




(b) 优化过程的评价函数曲线

图2 多阶超透镜逆向设计算法流程及评价曲线

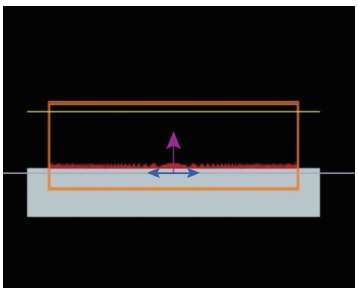
高度$h$和材料的折射率$n$共同决定了结构的相位响应$\varphi$。定义评价函数为焦点的强度值$I$，其表达式如公式(2)，其中$f$表示焦距，使用点源法来计算该强度值。由于整个正向传播模型是完全可微的，Pytorch可以自动计算焦点强度关于环带高度的梯度，使优化朝着焦点强度最大的方向进行。

$$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n-1)h \tag{1}$$

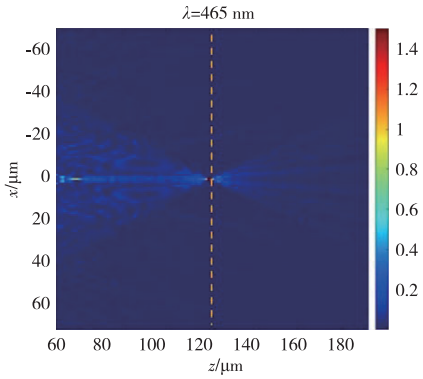
$$I=\left|E(x,z,h)\right|^2=\left|E(0,f,h)\right|^2 \tag{2}$$

对于由梯度下降方法设计的超透镜，使用有限时域差分法(Finite Difference Time Domain，FDTD)进行聚焦验证。如图3(a)所示，$x$，$y$，$z$方向都设置为完美匹配层PML边界条件，利用探测器在距离超透镜10 μm处获取超透镜的近场分布并计算到远场，平面波经过超透镜后，在$x$-$z$平面的光场分布如图3(b)所示，$\lambda$表示工作波长，黄色虚线表示焦平面的位置。可以发现仿真中得到焦点位置在120 μm处，与设计值非常一致，证明了该算法用于超透镜设计的有效性。

考虑到消色差透镜对于提高光学系统的成像质量非常重要，而传统的利用复杂透镜组来实现消色差的方法存在系统体积庞大的缺点。为此，通过



（a）单层多阶超透镜的布局



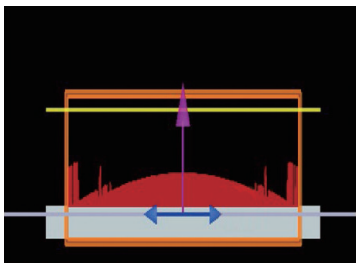

（b）$x$-$z$平面的光场分布

图 3　单层多阶超透镜 FDTD 仿真结果图

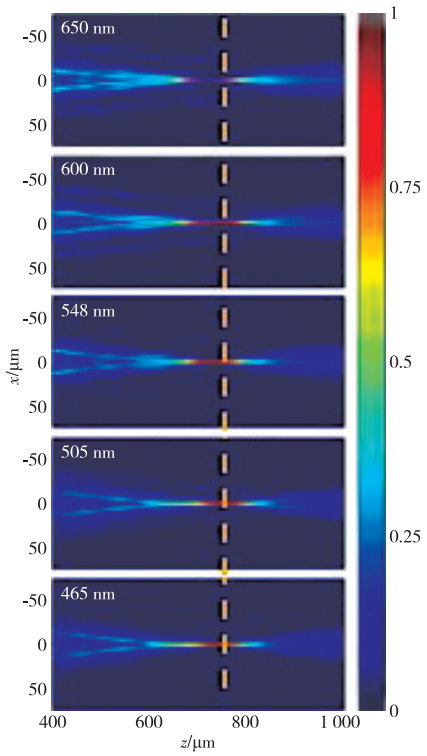
改进所提出的超透镜设计方法，进行了可见光波段消色差超透镜的逆向设计。将多波长消色差聚焦问题转换为数学问题，以最大化各个波长下的焦点强度的最小值为设计目标，重新定义评价函数，如公式（3）所示：

$$\max\{\min[I(x,z,h,\lambda)]\}=\max\{\min[I(0,f,h,\lambda)]\} \tag{3}$$

式中，$h$表示环带高度，$(x,z)$表示焦点中心位置，$\lambda$表示消色差波长。设定超透镜半径为 67.5 μm，焦距为 800 μm。最终的超透镜优化结果如图 4 所示，可以看到，逆向设计的超透镜能够聚焦在同一轴向位置，具有消色差效果。结果表明，仿真得到的焦距偏离设计值约 3.2%。



（a）消色差超透镜的布局




（b）不同波长下的焦距偏离

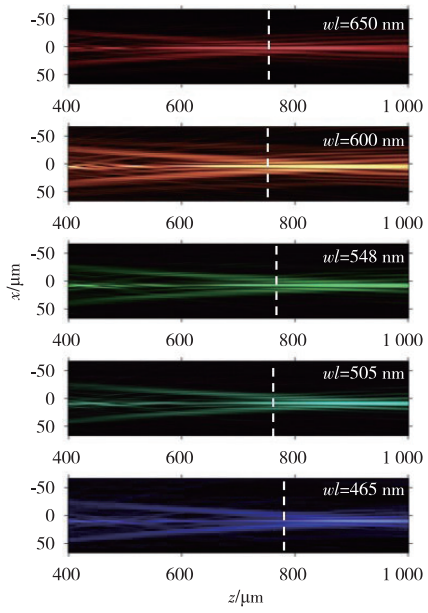
图 4　单层多阶超透镜 FDTD 仿真结果图

## 2　多阶超透镜制备及实验测试

采用双光子聚合激光直写方法加工逆向设计的消色差超透镜。设计的最大环带高度为 3 μm，根据公式（1），该高度能够覆盖 2π 的相位调制范围。材料选用 IP-Dip2 光刻胶，IP-Dip2 具有极高的打印分辨率，经过剂量测试，最小的打印线宽可达 170 nm，通过优化激光能量和扫描速度等加工参数，可以实现 200 nm 线宽的加工。采用逐层打印的思路加工整个样品，由于超透镜具有旋转对称性，在每一层的打印过程中，控制激光从内到外环形扫描。利用压电平台来控制环带的高度，压电平台的$z$方向定位精度可以达到 10 nm，满足设计中 50 nm 为一阶的高度要求。最终加工的超透镜，其电镜图如图 5（a）所示。对所加工的样品，搭建光路进行实验测量，沿光轴方向以 2 μm 为步长拍摄 500 张$x$-$y$平面的光强分布，随后处理得到在$x$-$z$面的聚焦光强分布，如图 5（b）所示。其中白色虚线表示各个波长的焦平面位置，各个波长准确聚焦在 780 μm 附近，相比设计的焦距，实验测量的焦距误差小于 3%，这和仿真结果基本一致。




(a) 超透镜的电镜图




(b) $x$-$z$面的聚焦光强分布

图5 消色差超透镜加工及实验表征

以波长650 nm的聚焦情况为例,实验测量的焦斑主瓣宽度为3.42 μm,比FDTD仿真的2.8 μm略大,但仍然在衍射极限以内,并且能观察到较弱的旁瓣,存在超振荡现象。产生该现象的原因是在设计中评价函数只计算了焦点中心位置的光能量,对焦点尺寸进行了最大程度压缩,且环带之间相互干涉,部分光能量被分散到其他区域形成旁瓣,使主焦斑小于分辨极限,可以利用该特性实现无标记的超分辨成像。旁瓣的存在会在一定程度上降低透镜的成像质量,减少对入射光的利用率,可以通过定义艾里斑区域内的光能量作为评价函数来进一步抑制旁瓣的产生。超透镜的实验聚焦情况和仿真存在一定误差,可能是由于加工误差导致。根据图5(a)中超透镜的放大图,中心区域环带并不是规则的圆环,为了确保环带首尾连接,激光扫描路径的终点并不和起点完全重合,而会超出一部分。对于外部环带,超出部分相比整个半径可以忽略,该现象并不明显,而对于非常靠近中心的环带半径只有不到1 μm,超出部分导致中心环带的不规则。部分环带的顶部存在一定程度弯曲,尤其是外侧环带,相比于中心环带,外环处于3D打印写场的边缘,飞秒激光能量较弱,光刻胶未能充分聚合导致力学性能较弱发生弯曲现象。为进一步减小误差,在未来的工作中可以采用具有更大杨氏模量的光刻胶材料,也可以分区域优化加工参数,使不同区域的结构都能够充分聚合。

## 3 结论

本文采用梯度下降方法逆向设计了具有亚波长环带宽度的单层多阶消色差超透镜。横向的环带宽度达到200 nm,确保了透镜口径的充分采样,解决了数值孔径受限于采样周期的问题,进一步优化环带高度自由度,扩展了超透镜的可优化参数空间。通过扫描不同参数下的打印线宽,优化双光子聚合激光直写的加工工艺,使打印精度满足横向200 nm、纵向50 nm的设计要求。消色差超透镜实验测得的焦距偏离设计值在3%以下,与仿真结果基本一致。该超透镜在具有消色差功能的同时,具有超振荡现象,焦斑大小小于衍射极限。所提出的逆向设计方法不需要通过耗时耗力的参数扫描构建超原子数据库,也不需要复杂的消色差物理机理推导,降低了设计门槛;所采用的双光子聚合3D打印工艺,突破了常规EBL工艺难以制备不同高度微结构的限制,为设计、加工和验证更高自由度的超表面提供了新的思路。该设计和加工方法有望促进高自由度超表面技术的进一步发展和工程化应用。

**参考文献:**

[1] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.

[2] Aiello M D, Backer A S, Sapon A J, et al. Achromatic varifocal metalens for the visible spectrum[J]. Acs Photonics, 2019, 6(10): 2432-2440.

[3] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic

metalens in the visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 227-232.

[4] Georgi P, Wei Q, Sain B, et al. Optical secret sharing with cascaded metasurface holography [J]. Science Advances, 2021, 7(16): eabf9718.

[5] Jiang Q, Jin G, Cao L. When metasurface meets hologram: principle and advances[J]. Advances in Optics and Photonics, 2019, 11(3): 518-576.

[6] Zhao R, Sain B, Wei Q, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption [J]. Light, Science & Applications, 2018, 7: 95.

[7] Chen W T, Khorasaninejad M, Zhu A Y, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces[J]. Light, Science & Applications, 2017, 6(5): e16259.

[8] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light [J]. Science, 2017, 358(6365): 896-901.

[9] Cai G, Li Y, Zhang Y, et al. Compact angle-resolved metasurface spectrometer[J]. Nature Materials, 2024, 23(1): 71-78.

[10] Wang R, Ansari M A, Ahmed H, et al. Compact multi-foci metalens spectrometer [J]. Light, Science & Applications, 2023, 12(1): 103.

[11] Meem M, Banerji S, Pies C, et al. Large-area, high-numerical-aperture multi-level diffractive lens via inverse design[J]. Optica, 2020, 7(3): 252-253.

[12] Ha Y, Wang L, Guo Y, et al. High-fidelity mode scaling via topological-optimized on-chip metalens for compact photonic interconnection[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2023, 4(3): 222-232.

[13] Choi M, Kim J, Moon S, et al. Roll-to-plate printable RGB achromatic metalens for wide-field-of-view holographic near-eye displays[J]. Nature Materials, 2025, 24(4): 535-543.

[14] Zu X, Sun X, Yan W, et al. Fast and efficient inverse design framework for multifunctional metalenses [J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(3): 2400886.

[15] Zou X, Zhang Y, Lin R, et al. Pixel-level Bayer-type colour router based on metasurfaces [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3288.

[16] Ren H, Fang X, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space [J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(11): 948-955.

[17] Ye F, Pivnenko M, Huang H, et al. Multi-height metasurface for wavefront manipulation fabricated by direct laser writing lithography[J]. Nanophotonics, 2023, 12(17): 3435-3442.

[18] Fang W, Lei J, Zhang P, et al. Multilevel phase supercritical lens fabricated by synergistic optical lithography [J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1469-1477.

[19] Yamada K, Watanabe W, Li Y, et al. Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses[J]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1846-1848.

[20] Pan C F, Wang H, Wang H, et al. 3D-printed multilayer structures for high-numerical aperture achromatic metalenses [J]. Science Advances, 2023, 9(51): eadj9262.

[21] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Extreme-depth-of-focus imaging with a flat lens [J]. Optica, 2020, 7(3): 214-217.

[22] Flores A, Wang M R, Yang J J. Achromatic hybrid refractive-diffractive lens with extended depth of focus [J]. Applied Optics, 2004, 43(30): 5618-5630.

[23] Plidschun M, Ren H, Kim J, et al. Ultrahigh numerical aperture meta-fibre for flexible optical trapping [J]. Light, Science & Applications, 2021, 10(1): 57.

[24] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323(6088): 533-536.

**作者简介：**

**王洪波**(2000—)，男，硕士研究生，主要研究方向为超表面微纳加工方法；

**蒋　强**(1989—)，男，副研究员，硕士生导师，主要研究方向为微纳光学、信息光学。