

制造误差对大尺度超振荡平面透镜聚焦性能的影响

何韬, 刘涛*, 刘康, 李国卿, 王佳怡, 田博, 杨树明**

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 针对大尺度超振荡平面透镜(SOL)的实际应用,基于严格的矢量角谱理论定量研究了多种典型制造误差对大尺度 SOL 聚焦性能的影响规律。理论计算结果表明:横向环带制造误差对振幅型 SOL(金属膜)和相位型 SOL(介质层)聚焦性能的影响规律基本一致,环带中心位置偏差主要影响 SOL 的聚焦焦距,环带宽度偏差主要影响 SOL 的聚焦光斑分布; ± 150 nm 范围内的位置偏差和宽度偏差是大尺度 SOL 各环带的最大制造允许公差;对于相位型 SOL,纵向刻蚀深度偏差主要影响聚焦光斑的强度, π 相位差对应的聚焦光斑强度最大;为使相位型 SOL 聚焦光斑保持较高强度,应使介质层刻蚀深度对应的相位调制量保持在 $(0.8\sim 1.2)\pi$ 的范围内。

关键词 衍射;超振荡平面透镜;振幅型透镜;相位型透镜;制造误差;超分辨

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2005001

Effect of Manufacturing Errors on Focusing Performance of Large-Scale Super-Oscillatory Lens

He Tao, Liu Tao*, Liu Kang, Li Guoqing, Wang Jiayi, Tian Bo, Yang Shuming**

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract The influence of different manufacturing errors on focusing performance of large-scale super-oscillatory lens (SOL) is revealed through a quantitative study for practical use based on rigorous vector angular spectrum theory. Theoretical calculation results show that the influence of the manufacturing errors on focusing performance of amplitude-type SOL (metallic film) and phase-type SOL (dielectric layer) is the same; central position deviation mainly affects the focusing focal length, while the width deviation mainly influences the focal spot distribution; the position and width deviations within the range of ± 150 nm are the maximum allowable manufacturing tolerances for each SOL ring belt. Longitudinal etching depth deviation mainly affects the focused intensity of the phase-type SOL. When the relative phase difference introduced by the etching depth is π , the focused intensity reaches its maximum. To maintain a greater focused intensity, phase modulation should be kept within the range of $0.8\pi\sim 1.2\pi$.

Key words diffraction; super-oscillatory lens; amplitude-type lens; phase-type lens; manufacturing error; super-resolution

OCIS codes 050.6624; 050.1965; 100.6640

1 引 言

光学透镜是光学系统的基本组成单元,传统的光学透镜的聚焦及成像能力受衍射极限 $(0.5\lambda/NA)$ 的客观约束,其中 λ 为照明波长, NA 为光学系统物镜数值孔径。为了突破光学衍射极限及实现超分辨光学成像,超振荡平面透镜(SOL)近几年被提出并受到极大关注^[1-10]。SOL由一系列微米尺度同心圆环构成,通过环带之间衍射光束的精细相

干叠加,在远场形成超越衍射极限的亚波长聚焦光斑,是一种可以对相干光场进行直接聚焦的平面化透镜^[1]。相比于传统折射光学透镜,SOL具有轻薄的结构和优异的聚焦性能,有助于光学系统的微型化和集成化。现有SOL的外形尺寸大多集中在几十微米到几百微米不等,径向环带宽大多在数百纳米^[1-8],总体上属于微尺度范围。目前微尺度SOL在制造、应用和表征中存在的突出问题有:1)为获得超衍射聚焦性能,设计焦距需较小,短工作距离导致

收稿日期: 2020-05-22; 修回日期: 2020-06-19; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金(51722509)、国家重点研发计划(2017YFB1104700)

* E-mail: liu8483@xjtu.edu.cn; ** E-mail: shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

实用性较差;2)依赖于电子束曝光技术的制造成本较高,加工难度较大,不利于批量规模化加工及应用;3)测试表征相对困难,主要依赖于扫描电镜、原子力显微镜等超高分辨率检测仪器。因此发展毫米-厘米级大尺度 SOL 成为其实际应用中亟需解决的关键问题,同时为了降低微纳加工的成本,必须将最小环宽设计为较大尺度,即将特征尺度从亚微米增大至数十微米量级,在不改变 SOL 平面化和轻薄化基本特征的同时,可望将 SOL 提升至实用化水平。

目前国内外对毫米级以上的 SOL 研究较少,主要偏向于 SOL 的优化设计^[11-13],然而在 SOL 的应用中必须面对的实际问题是 SOL 的制造允许误差对其聚焦性能的影响,当前尚未见到相关的国内外研究报告,揭示大尺度 SOL 的制造允许公差对其规模化工程应用具有重要意义。振幅型 SOL 和相位型 SOL 的制造允许公差直接决定了需要采用的三维微纳加工技术,若制造允许公差在 100 nm 以内时,则必须采用高精度的微纳制造方法,如电子束曝光和聚焦离子束刻蚀,若制造允许公差在 100 nm 以上时,则可以考虑采用成本更低、工艺成熟的紫外光刻技术进行制造。对于相位型 SOL,纵向相位调制深度对

其聚焦性能的影响也必须予以研究,进而确定相位型 SOL 实际的制造允许的刻蚀偏差范围,这些研究结果对相应的刻蚀加工工艺提出了明确的要求。

本文基于严格的矢量角谱理论(VAS)^[13],利用严格的三维时域有限差分法进行了实验验证^[13-16]。首先采用矢量角谱理论和遗传算法设计得到多组大尺度、长焦距、聚焦性能良好的振幅型和相位型 SOL,接着重点开展了大尺度 SOL 制造允许公差的定量比较研究,以揭示阐明多种典型制造误差对聚焦性能的影响规律。

2 SOL 的理论设计

SOL 由一系列微纳米尺度同心环带构成。典型的振幅型 SOL 与相位型 SOL 结构如图 1 所示。SOL 中各环带具有相同的径向宽度,环带数量 N 由 SOL 的最大半径 r_N 与最小径向环宽 Δr 共同决定, $N=2r_N/\Delta r$ 。对 SOL 中任意一个环带结构,可用一组参数 $\{r_i, r_{i+1}, h\}$ 来描述,其中 r_i, r_{i+1} 分别表示 SOL 第 i 个环带的内径与外径, h 表示金属膜或介质材料的厚度。SOL 中各环带的透过率可通过优化算法设计得到。

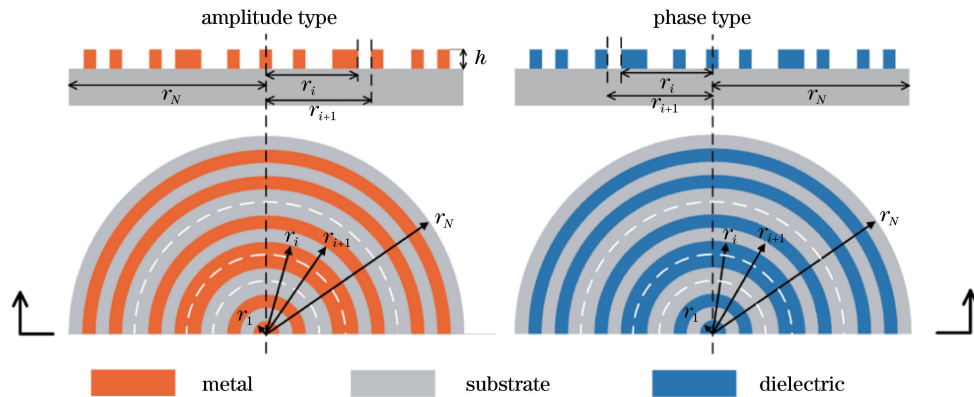


图 1 振幅型 SOL 与相位型 SOL 结构示意图

Fig. 1 Structure of amplitude-type SOL and phase-type SOL

SOL 的衍射聚焦如图 2 所示,当特定偏振态的矢量光束垂直照射 SOL 时,SOL 之后光场衍射传播空间内任意一点 P 的电场分布可由 VAS 唯一确定^[13,16]。例如,当入射光是沿 X 方向振动的线偏振光时,电场各分量的计算公式为

$$\begin{cases} E_x(r, z) = \int_0^\infty A_0(l) \exp[j2\pi q(l)z] J_0(2\pi lr) 2\pi l dl \\ E_y(r, z) = 0 \\ E_z(r, \varphi, z) = -j \cos \varphi \int_0^\infty \frac{l}{q(l)} A_0(l) \times \\ \exp[j2\pi q(l)z] J_1(2\pi lr) 2\pi l dl \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $q(l) = (1/\lambda^2 - l^2)^{1/2}$, $\lambda = \lambda_0/n_w$, λ_0 是入射照明光的波长, n_w 是工作介质折射率; $J_0(\cdot)$ 和 $J_1(\cdot)$ 分别是零阶和一阶第一类贝塞尔函数; $A_0(l)$ 是环带片后表面位置电场的角谱,计算公式为

$$A_0(l) = \int_0^\infty t(r) g(r) J_0(2\pi lr) 2\pi r dr, \quad (2)$$

其中 $t(r)$ 是 SOL 的标量近似透过率函数, $g(r)$ 表示入射光的振幅分布。当入射光振幅服从均匀分布时, $g(r) = 1$ 。而对于常用的高斯光,其振幅 $g(r)$ 满足

$$g(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right), \quad (3)$$

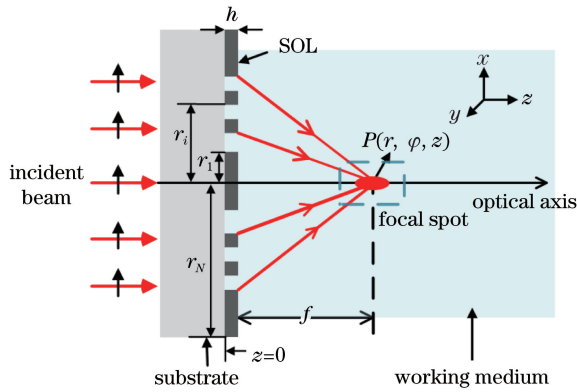


图 2 SOL 衍射聚焦示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diffraction focusing by SOL
 其中 w_0 为束腰半径。基于 VAS 的 SOL 衍射光场计算的有效性已由大量的仿真及实验所验证^[9,10,14-15]。在设计 SOL 时,首先依据实际需要的衍射光场分布建立约束优化模型,然后通过优化算法对 SOL 的环带宽度或透过率等参数进行优化,经过连续迭代运算后最终得到满足或接近使用要求的 SOL。

本文设定入射光为沿 X 方向振动的均匀线偏振光,波长为 632.8 nm, SOL 的工作介质为空气(更一般化的偏振态、波长和介质均可以采用相同的方法)。为了得到聚焦性能优越的 SOL,对 SOL 的

聚焦焦距、轴向光场暗场旁瓣、焦平面光场暗场旁瓣、横向聚焦光斑的半峰全宽(FWHM)四个方面进行同时约束,利用遗传算法及快速汉克尔变换算法对环带透过率进行迭代优化^[13,16],得到了一系列大尺度的振幅型 SOL 和相位型 SOL,经分析比较所得规律一致,为精简篇幅,综合优选振幅型 SOL₁ 与相位型 SOL₂₋₄ 进行 SOL 横向制造误差研究,选择相位型 SOL₂₋₄ 进行 SOL 纵向制造误差研究,相位型 SOL 具有显著的高光效特性及良好的应用前景。SOL₁₋₄ 的参数如表 1 所示, D 为 SOL 的最大直径, Δr 为 SOL 的最小径向环宽, f 为 SOL 的聚焦焦距,FWHM 为 SOL 聚焦光斑的半峰全宽(横向), N 为 SOL 的环带数量。SOL 各环带透过率由透过率函数 $t_i (i=1,2,\dots,N)$ 表示。对于振幅型 SOL,各环带透过率通过 $\{0,1\}$ 进行编码,“0”代表该环带不透光,“1”代表该环带透光;对于相位型 SOL,各环带透过率通过 $\{-1,1\}$ 进行编码,“-1”代表该环带处的介质层未被刻蚀,即存在相位调制,“1”表该环带处的介质层进行了刻蚀,即不存在相位调制,由于是二值相位调制,因此可以用复振幅 $t = \exp(j\phi)$ 表示透过率, ϕ 是(相对)相位调制量。为了不产生歧义和方便表达,在表 1 中编码“-1”用“b”替代。

表 1 优化设计的 SOL 参数

Table 1 Optimized design parameters of SOL

SOL	Type	D/mm	$\Delta r/\mu\text{m}$	$f/\mu\text{m}$	FWHM/λ	N	t_i
SOL ₁	Amplitude	2	25	400	0.468	40	[00001 11111 11110 10011 10101 10101 10100 11101]
SOL ₂	Phase	2	25	400	0.471	40	[11111 11111 bbbb1 b11bb b111b bb11b 11b11 bbb1b]
SOL ₃	Phase	4	40	800	0.467	50	[bbb1b 11111 111bb 1b1bb b11bb bbb1b 1bb1b 11bbb 1b1b1 1bb1b]
SOL ₄	Phase	8	80	1600	0.457	50	[b11bb bbbbb bbbb1 1bbb1 11b1b 11bbb 1bb1b b11b1 b1b11 b111b]

SOL₁₋₄ 沿轴的光场归一化强度分布、沿轴向各位置点所在垂直平面内的横向 FWHM 分布如图 3(a)~(d)所示,图中实线为沿轴的光场归一化强度分布,虚线为轴向各点所在垂直平面内的横向 FWHM 分布,点线为阿贝衍射极限($0.5\lambda/NA$)。SOL₁₋₄ 聚焦光斑强度分布如图 3(e)~(h)所示。由图 3 可知,SOL₁₋₄ 均实现了对入射光的直接聚焦,计算焦距与设计焦距基本一致。根据 SOL₁₋₄ 的直径 D 及聚焦焦距 f 计算得到 SOL₁₋₄ 的数值孔径 $NA = 0.93$,对应的衍射极限为 $0.537\lambda (0.5\lambda/NA)$ 。由图 3 可知,SOL₁₋₄ 各自焦点及附近区域的横向 FWHM 小于衍射极限 0.537λ ,即实现了超分辨聚焦。同时各 SOL 聚焦光斑附近的暗场旁瓣被

极大程度地压缩,有利于后续光斑探测、成像及微纳加工应用。值得一提的是,对于大数值孔径 SOL,在线偏振光入射条件下,由矢量衍射方法计算得到的焦平面聚焦光斑通常呈椭圆状或哑铃状^[14-16],这是因为在计算中考虑了电场中的 E_z 分量。然而,在使用大数值孔径 SOL 进行光场探测时,后续配合使用的大数值孔径物镜系统对电场中的 E_z 分量存在偏振滤波作用,因此最终实际探测到的聚焦光斑依然呈圆形^[15,17]。此外,从图 3 中还可以看出,对于具有相同直径的振幅型 SOL₁ 和相位型 SOL₂,相位型 SOL₂ 的聚焦光斑具有更显著的光场聚焦强度,这也是相位型 SOL 相较于振幅型 SOL 的一个突出优势^[5,16]。

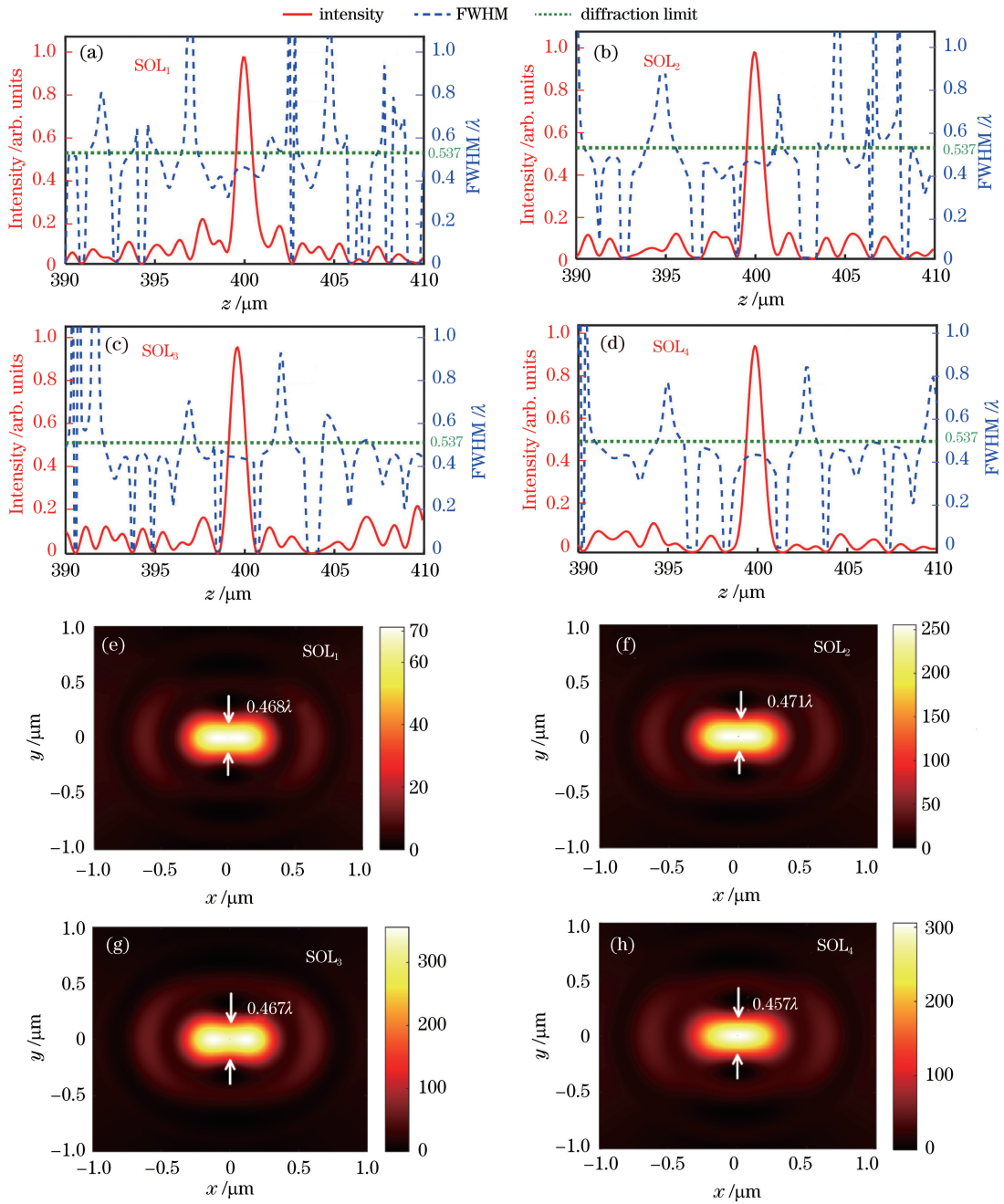


图 3 SOL₁₋₄ 沿轴光强分布、横向 FWHM 分布以及聚焦光斑强度分布。(a)~(d)沿轴光强分布、横向 FWHM 分布；(e)~(h)聚焦光斑强度分布

Fig. 3 Distribution of axial intensity, transverse FWHM and focal spot intensity for SOL₁₋₄.

(a)–(d) Axial intensity, transverse FWHM; (e)–(h) focal spot intensity

3 SOL 制造误差

目前, SOL 常见的制造方法有电子束曝光和聚焦离子束刻蚀^[2,5-6], 也有采用激光直写和紫外光刻技术的制造方法^[18-19]。无论采用何种制造方法, 振幅型 SOL 和相位型 SOL 在制造过程中都包含有镀膜和刻蚀两个基本步骤, 两种类型 SOL 的简要加工制造流程如图 4 所示。振幅型 SOL 和相位型 SOL

制造过程的核心思想均为利用刻蚀膜层的方法形成一系列环形槽, 并以此实现二元振幅或相位调控, 进而通过刻蚀区域与未刻蚀区域入射光之间的精细相干叠加在远场形成所需的衍射光场。基于此, 将 SOL 中需要进行刻蚀的环带定义为制造环带, 对于 SOL 中的某制造环带, 在横向存在一个由设计决定的理想位置及宽度, 环带的位置定义为 SOL 中心至环带中心的距离。在实际制造过程中, 受制造方法、

设备精度、人员操作等因素的影响,实际制造环带在位置和宽度上均可能偏离理想状态。SOL 横向环带制造误差如图 5(a)所示,图中白色环带为设计环带, p_1 和 w_1 分别为设计环带的径向中心位置和宽度,最外层环带为实际加工制造的环带, p_2 和 w_2 分别为实际制造环带的中心位置和宽度。现有研究中仅初步分析了环带宽度偏差对 SOL 聚焦性能的影响,忽略了环带位置偏差所带来的影响^[20-21]。为了更好地分析环带制造偏差对大尺度 SOL 聚焦性能的影响,将制造误差分为:横向制造误差和纵向制造误差。对于振幅型 SOL,一般通过镀薄层金属膜来实现,此时纵向制造误差为金属膜厚度偏差;对于相位型 SOL,一般通过介质膜刻蚀实现,此时纵向

制造误差为刻蚀深度偏差。横向制造误差主要包括环带位置误差和环带宽度误差,环带位置误差由当前环带的径向中心位置的偏差表示,环带宽度误差为实际宽度与设计宽度的偏离程度,定义 $\epsilon_p = p_2 - p_1$ 为环带的位置偏差, $\epsilon_w = w_2 - w_1$ 为环带的宽度偏差。

对于相位型 SOL, SOL 的聚焦性能还与纵向介质层刻蚀深度有关。在相位型 SOL 介质层刻蚀过程中,受刻蚀方法、设备精度、人员操作等因素的影响,实际刻蚀深度与设计刻蚀深度之间往往存在偏差。相位型 SOL 纵向刻蚀偏差如图 5(b)所示,图中 h_1 为设计刻蚀深度, h_2 为实际刻蚀深度,纵向刻蚀误差定义为 $\epsilon_h = h_2 - h_1$ 。

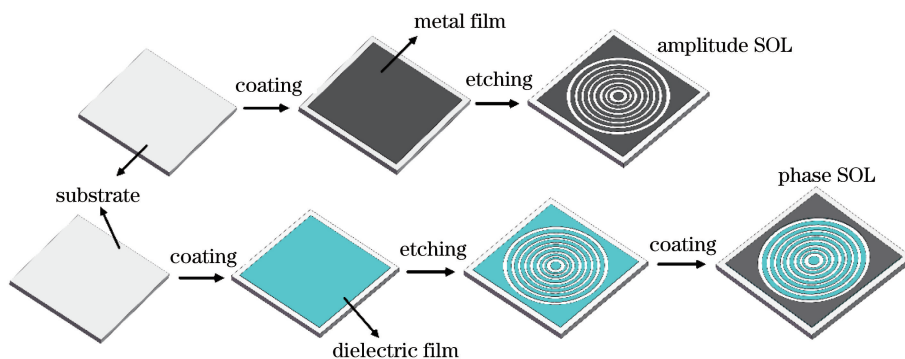


图 4 振幅型 SOL 和相位型 SOL 简要制造流程

Fig. 4 Brief manufacturing process of amplitude-type SOL and phase-type SOL

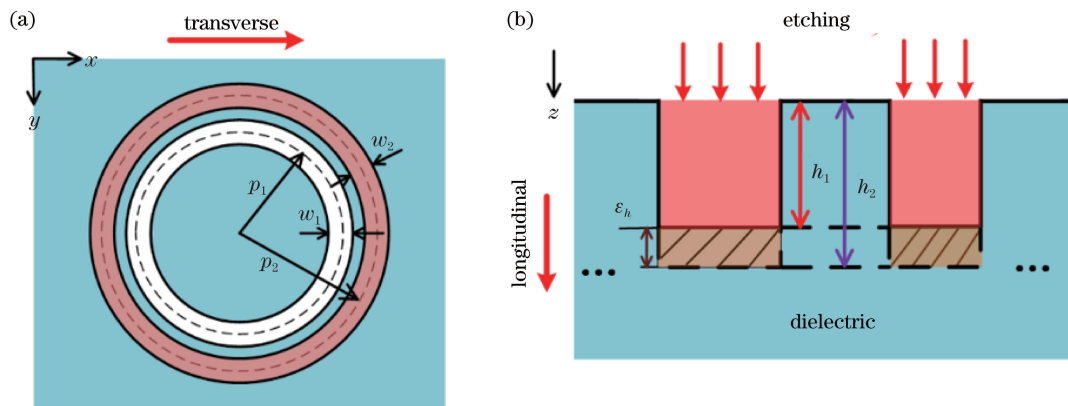


图 5 SOL 环带制造误差示意图。(a) 横向误差;(b) 纵向误差

Fig. 5 Diagram of ring belt manufacturing errors: (a) Transverse error; (b) longitudinal error

4 横向制造误差对 SOL 聚焦性能的影响

对于振幅型 SOL 和相位型 SOL,横向环带制造误差有三种类型,即单一位置偏差、单一宽度偏差、位置偏差和宽度偏差同时存在的情形。本节分析了三种类型的横向制造偏差对振幅型 SOL₁ 和相位型 SOL₂ 聚焦性能的影响。对于振幅型 SOL₁,当

存在横向环带制造偏差时, SOL₁ 聚焦性能变化如图 6 所示。图 6(a)表明,位置偏差从 -250 nm 变化至 250 nm 时, SOL₁ 焦距偏差从 -260 nm 变化至 220 nm,二者呈近似线性关系,但相比于 SOL₁ 的焦距 400 μm, ±250 nm 范围内的位置偏差引起的 SOL₁ 焦距移动不超过 260 nm,不会对后续探测或实验产生较大影响。图 6(b)表明,位置偏差和宽度偏差对 SOL₁ 焦平面光场的暗场光强分布影响较

小,在研究的偏差范围内, SOL_1 焦平面暗场旁瓣比在保持在 0.1 以下。图 6(c)、(d)表明,位置偏差对 SOL_1 聚焦光场轴向暗场旁瓣比和聚焦光斑尺寸影响较小,而宽度偏差对轴向光场分布和聚焦光斑尺寸影响较大。当宽度偏差超过 ± 150 nm 的范围时, SOL_1 的聚焦光场受到了较大的影响,特别是当宽度偏差达到 -250 nm 时,轴向暗场光强旁瓣比增大至 0.56,光斑 FWHM 增大了 23 nm,这意味着理想

的聚焦光场受到了较大的影响。当对 SOL_1 各制造环带添加相同大小的位置偏差和宽度偏差时, SOL_1 的聚焦性能参数变化规律与单一宽度偏差作用时的规律基本相同。因此,在实际加工制造中,对于振幅型 SOL,当环带制造的位置偏差和宽度偏差同时存在时,应该尽可能控制宽度偏差的大小;同时,应该尽可能将偏差控制在 ± 150 nm 的范围内,以确保 SOL 实现良好聚焦。

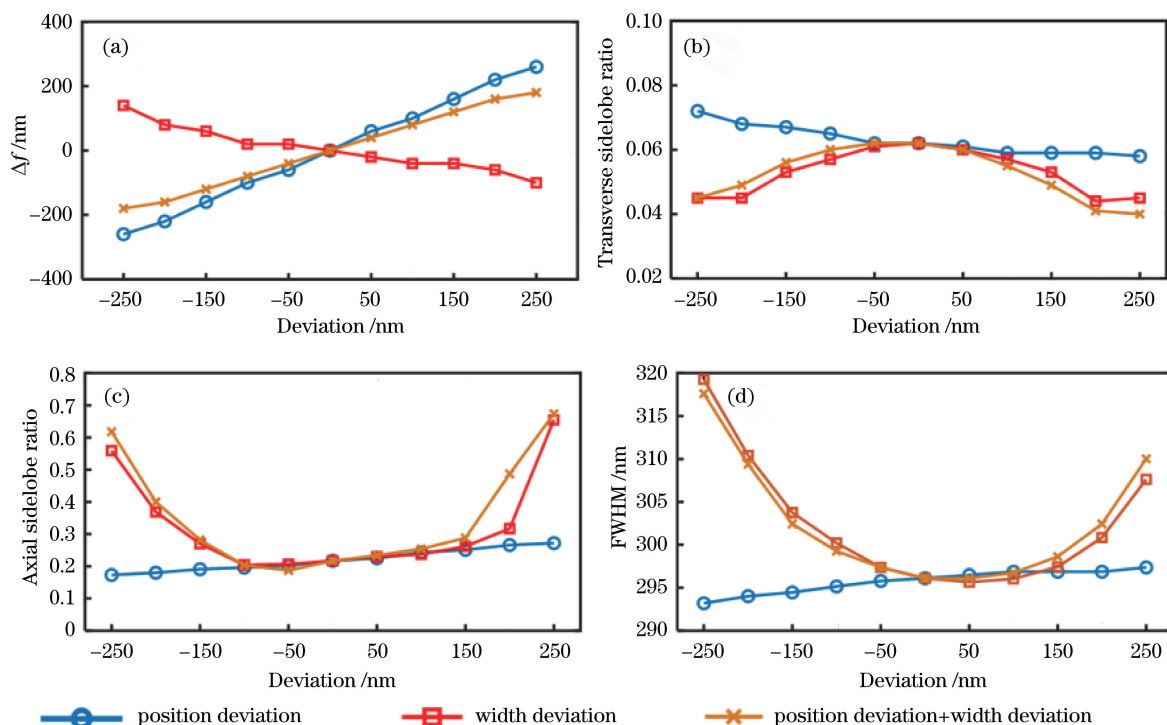


图 6 SOL_1 聚焦性能变化。(a) 聚焦焦距偏差;(b) 焦平面横向暗场旁瓣比;(c)轴向暗场旁瓣比;(d) 光斑横向尺寸
Fig. 6 Focusing performance of SOL_1 . (a) Focal distance deviation; (b) transverse sidelobe ratio; (c) axial sidelobe ratio; (d) transverse focal size

对于相位型 SOL_2 ,当存在横向环带制造偏差时, SOL_2 聚焦性能变化如图 7 所示。结合图 6 和图 7 可知,横向环带制造偏差对相位型 SOL_2 聚焦性能的影响规律与对振幅型 SOL_1 的影响规律基本一致。位置偏差主要引起 SOL_2 聚焦焦距的移动,宽度偏差主要影响 SOL_2 轴向光场分布以及聚焦光斑的 FWHM。当宽度偏差超过 ± 200 nm 的范围时, SOL_2 轴向光场受到较大的影响,具体表现为旁瓣增大乃至焦点位置发生明显偏移,同时聚焦光斑尺寸也明显大于设计值,影响 SOL_2 的超分辨性能。当两种类型的环带制造偏差同时存在时,应首先控制宽度偏差的大小,同时计算结果表明,把 SOL 的两种制造偏差控制在 ± 150 nm 的范围内时仍可以得到较为理想的聚焦光场分布。

总体而言,对于大尺度振幅型 SOL 和相位型

SOL,当加工制造过程中同时存在横向位置偏差和宽度偏差时,应优先控制对 SOL 聚焦性能影响较大的宽度偏差的大小,同时为使 SOL 保持较好的聚焦性能,应把位置偏差和宽度偏差控制在 ± 150 nm 的范围内。随着光刻工艺的不断发 展,目前较为成熟的紫外光刻工艺的分辨率达到了 100 nm 左右^[22],因此,在选择大尺度 SOL 的制造方式时可以考虑紫外光刻工艺,以降低 SOL 的制造成本,实现 SOL 的规模化生产及工程应用。

5 纵向制造误差对相位型 SOL 聚焦性能的影响

对于振幅型 SOL,纵向制造偏差由金属膜镀膜的厚度决定,基本规律相对简单,前期已经进行了研究^[15,23],揭示了基本规律,即:将振幅型 SOL 的金

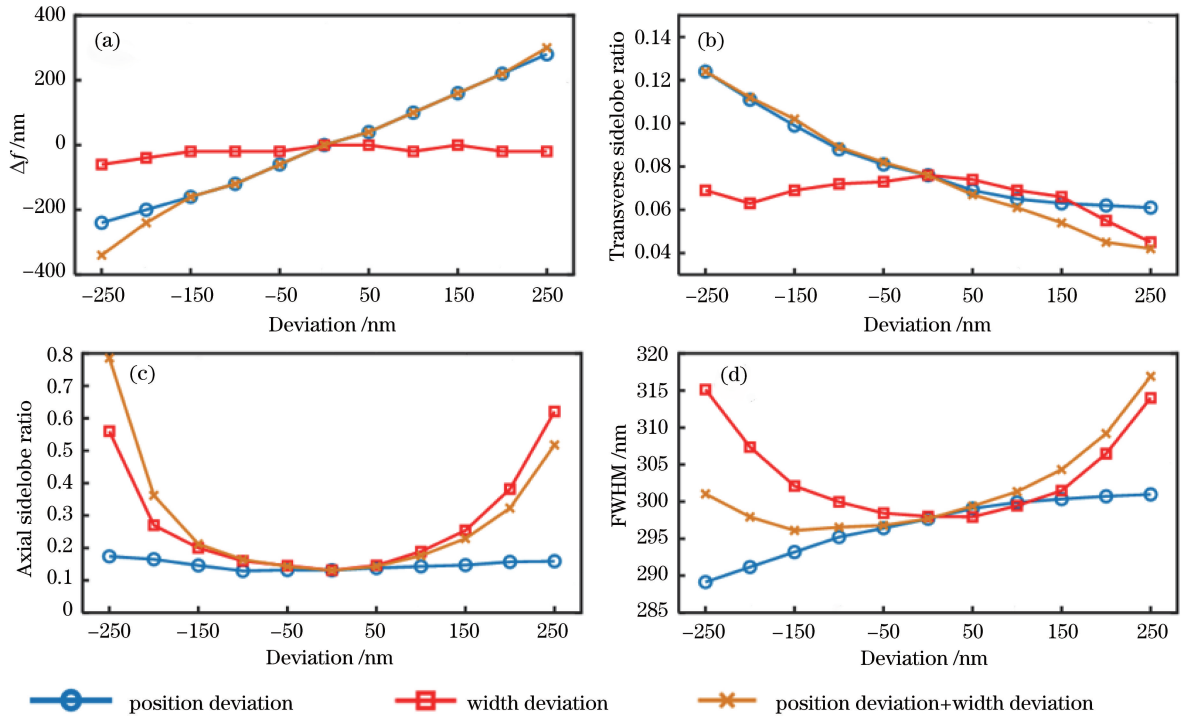


图 7 SOL₂ 聚焦性能变化。(a) 聚焦焦距;(b) 焦平面横向暗场旁瓣比;(c)轴向暗场旁瓣比;(d) 光斑横向尺寸
Fig. 7 Focusing performance of SOL₂. (a) Focal distance deviation; (b) transverse sidelobe ratio; (c) axial sidelobe ratio; (d) transverse focal size

属膜厚度设定为照明波长的 1/10~1/6(即 $\lambda/10 \sim \lambda/6$)时 SOL 的实际聚焦特性与理论较为接近,且采用金属铝膜的适用性更好^[23]。

对于相位型 SOL,相位调制量 φ 由介质材料刻蚀深度 h 决定,两者满足

$$h = \frac{\lambda\varphi}{2\pi(n_{\text{sol}} - n_w)}, \quad (4)$$

其中, λ 为照明激光波长, n_{sol} 和 n_w 分别为 SOL 介质材料的折射率及 SOL 所处工作介质的折射率。由(4)式可知,介质材料刻蚀深度 h 与相位调制量 φ 呈线性关系。本文第 3 节提到,在纵向介质材料刻

蚀的过程中,实际刻蚀深度 h_2 与设计刻蚀深度 h_1 之间可能存在偏差 Δh ,刻蚀深度偏差 Δh 会引起相位调制量偏差 $\Delta\varphi$,最终影响 SOL 的聚焦性能。由于相位型 SOL 的聚焦性能与相位调制量 φ 直接相关,因此首先研究不同相位调制量 φ 对同一 SOL 聚焦性能的影响。对于相位型 SOL₂,相位调制量 φ 从 $\pi/2$ 增大至 $3\pi/2$ 时,SOL₂ 沿轴归一化光强分布和焦平面内横向归一化光强分布如图 8 所示。当 φ 变化时,SOL₂ 沿轴光强分布及焦平面横向光强分布曲线基本重合,这说明相位调制量在较大范围内变化时不会对 SOL 的焦距和暗场光强分布产生明

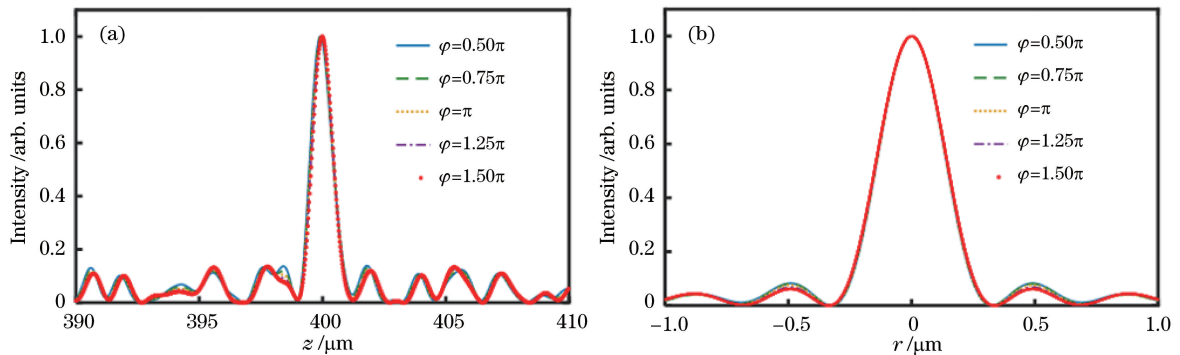


图 8 SOL₂ 聚焦光场随相位调制量 φ 的计算结果。(a)轴向光场分布;(b)焦平面横向光场分布
Fig. 8 Calculation result of focusing field with different phase modulation. (a) Axial light field distribution; (b) transverse light field distribution of focal plane

显的影响。

进一步计算表明,相位调制量 φ 的变化对相位型 SOL 聚焦光斑的强度会产生较大的影响,同时 SOL 聚焦光斑的 FWHM 也会受到一定的影响。对于相位型 SOL₂₋₄,当相位调制量变化时,SOL₂₋₄ 聚焦光斑中心强度和横向 FWHM 变化趋势如图 9 所示。由图 9 可知,当相位调制量 φ 达到 π 时,聚焦光斑中心强度达到了最大值,当相位调制量偏离设计值 π 时,光斑中心强度呈下降趋势。例如对于 SOL₃,相位调制量 φ 大小为 0.5π 和 1.5π 时,聚焦光斑中心强度相比于 $\varphi = \pi$ 时分别下降了 52% 和 46%。另一方面,相位调制量 φ 的变化会引起 SOL

聚焦光斑尺寸的变化,但总体而言变化较小。对于 SOL₂₋₄,当 φ 从 0.5π 变化至 1.5π 时,聚焦光斑的 FWHM 也仅分别变化了 3.7%、6.2%、1.1%。可见,相位调制量主要对相位型 SOL 聚焦光斑的强度产生影响,并且当相位调制量 φ 在 $\pi \pm 0.2\pi$ 的范围内时,SOL₂₋₄ 聚焦光斑强度降幅较小,降幅均不超过 15%。因此在设计相位型 SOL 相位调制量 φ 的时候, $\pi \pm 0.2\pi$,即 $(0.8 \sim 1.2)\pi$,属于比较理想的范围;进一步地,刻蚀深度越浅,微加工越容易,同时光场在真实介质层沟槽中的纵向模场传输时标量透过率假设的近似程度越好,因此进一步取 $(0.8 \sim 1)\pi$ 作为理想的刻蚀设计范围。

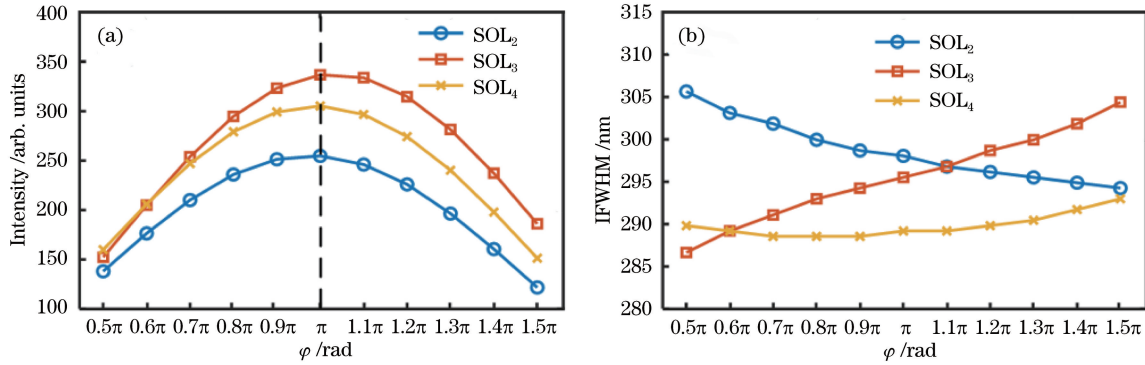


图 9 SOL₂₋₄ 聚焦性能随相位调制量 φ 的变化。(a) 光斑中心强度;(b) 光斑横向尺寸

Fig. 9 SOL₂₋₄ focusing performance varying with phase modulation φ . (a) Spot center intensity; (b) transverse spot size

为了进一步验证上述理论计算结果的正确性,基于时域有限差分法(FDTD)研究了介质材料刻蚀深度对小尺度相位型 SOL₅ 聚焦光斑强度的影响(SOL₅

的结构参数见表 2)。时域有限差分法是微纳光学领域的常用研究方法^[14,24],是一种严格的电磁场数值计算方法,其可靠性和仿真精度受到了广泛认可。

表 2 相位型 SOL₅ 结构参数

Table 2 Structural parameter of phase-type SOL₅

SOL	Type	$D/\mu\text{m}$	$\Delta r/\mu\text{m}$	$f/\mu\text{m}$	FWHM/ λ	t_i
SOL ₅	Phase	10	0.2	2	0.443	[1bb11 bbb1 bbb1b bb1bb 11b11]

在三维 FDTD 电磁仿真模型中,实现 SOL₅ 相位调制的介质材料选为 Si₃N₄,在 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 波长下 Si₃N₄ 的折射率为 1.91^[6],SOL₅ 环带结构外的区域使用金属铝膜作为光遮挡材料,厚度设置为 100 nm。FDTD 采用完全匹配层(PML)作为吸收边界,设置总场散射场(TFSF)光源作为入射光源。FDTD 三维仿真区域设置为 $x, y: -6 \sim 6 \mu\text{m}, z: -2 \sim 7 \mu\text{m}$,仿真区域网格划分为 $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}(x, y, z)$ 。

不同介质材料刻蚀深度下 SOL₅ 的相位调制量分布及聚焦光斑中心强度分布如图 10 所示,图中方框实线为 SOL₅ 相位调制量分布,圆形实线为 SOL₅ 聚焦光斑中心强度分布。SOL₅ 介质材料刻蚀深度

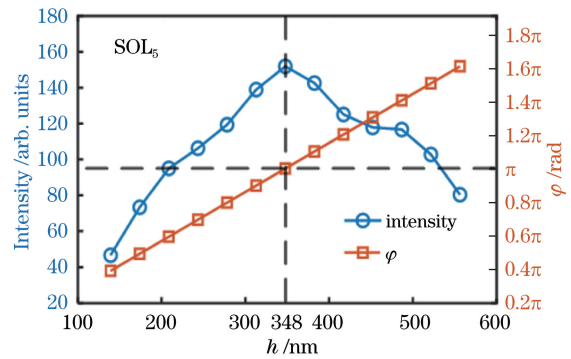


图 10 SOL₅ 相位调制量和聚焦光斑中心强度随刻蚀深度的变化

Fig. 10 Phase modulation and focused central intensity varying with the etching depth of SOL₅

h 与相位调制量 φ 呈线性关系, 当刻蚀深度达到 348 nm 时, SOL_5 的相位调制量为 π , 此时 SOL_5 聚焦光斑的中心强度达到最大值; 当刻蚀深度大小偏离 348 nm, 即相位调制量 φ 偏离 π 时, 聚焦光斑中心强度下降, 结果与图 9(a) 保持一致。以相位调制量 $\varphi = \pi$ (刻蚀深度 $h = 348$ nm) 为基准, 相位调制量偏差 $\Delta\varphi$ 在 $\pm 0.2\pi$ 范围内 (刻蚀偏差 Δh 在 ± 69.6 nm 范围内) 时 SOL_5 聚焦光斑仍能保持较高的强度。同时, 考虑到刻蚀工艺的难度和成本, 应尽量选择浅刻蚀, 避免深刻蚀。

6 结 论

基于矢量角谱理论及遗传算法设计了宏观尺度的振幅型和相位型 SOL, 所设计的 SOL 均实现了超分辨聚焦性能, 同时聚焦光场具有较小的暗场旁瓣分布。通过重点分析多种典型制造误差对 SOL 聚焦性能的影响, 理论计算结果表明横向环带制造偏差对振幅型和相位型 SOL 的影响规律基本相同, 具体表现为环带中心位置偏差主要影响 SOL 的焦距, 宽度偏差主要影响 SOL 聚焦光斑的分布。为了保证大尺度 SOL 具有良好的实际聚焦效果, 在制造中应将位置偏差和宽度偏差控制在 ± 150 nm 的最大允许误差范围内。目前较为成熟的紫外光刻工艺能够达到 100 nm 左右的分辨率, 因此在选择大尺度 SOL 制造方式时, 可以考虑成本更低、更易实现规模化的紫外光刻工艺。对于相位型 SOL, 介质层刻蚀深度直接影响 SOL 的相位调制量, 进而影响 SOL 的聚焦性能。理论计算结果表明在 0.5π 至 1.5π 的相位调制范围内, 相位型 SOL 聚焦光斑的强度发生显著变化, 当相位调制量达到 π 时, SOL 聚焦光斑的光强达到最大, 这一结果与采用三维时域有限差分法电磁仿真时的结果一致。在实际制造过程中, 为了避免相位型 SOL 聚焦光斑强度发生较大的衰减, 应将介质层刻蚀深度对应的相位调制量保持在 $\pi \pm 0.2\pi$ 的范围内, 同时宜采用浅刻蚀, 而避免深刻蚀。

参 考 文 献

- [1] Rogers E T F, Lindberg J, Roy T, et al. A super-oscillatory lens optical microscope for subwavelength imaging [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 432-435.
- [2] Yuan G H, Rogers E T, Zheludev N I. Achromatic super-oscillatory lenses with sub-wavelength focusing [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(9): e17036.
- [3] Li M Y, Li W L, Li H Y, et al. Controllable design of super-oscillatory lenses with multiple sub-diffraction-limit foci [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1335.
- [4] Diao J S, Yuan W Z, Yu Y T, et al. Controllable design of super-oscillatory planar lenses for sub-diffraction-limit optical needles [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 1924-1933.
- [5] Yu A P, Chen G, Zhang Z H, et al. Creation of sub-diffraction longitudinally polarized spot by focusing radially polarized light with binary phase lens [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38859.
- [6] Chen G, Wu Z X, Yu A P, et al. Planar binary-phase lens for super-oscillatory optical hollow needles [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4697.
- [7] Yuan G H, Rogers E T F, Roy T, et al. Planar super-oscillatory lens for sub-diffraction optical needles at violet wavelengths [J]. *Scientific Reports*, 2015, 4: 6333.
- [8] Wu Z X, Jin Q J, Zhang K, et al. Binary-amplitude modulation based super-oscillatory focusing planar lens for azimuthally polarized wave [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(4): 170660.
武志翔, 金启见, 张坤, 等. 基于二值振幅调控的角向偏振光超振荡聚焦平面透镜 [J]. *光电工程*, 2018, 45(4): 170660.
- [9] Chen G, Li Y Y, Yu A P, et al. Super-oscillatory focusing of circularly polarized light by ultra-long focal length planar lens based on binary amplitude-phase modulation [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29068.
- [10] Wu J, Wu Z X, He Y H, et al. Creating a nondiffracting beam with sub-diffraction size by a phase spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6274-6282.
- [11] Li W L, Yu Y T, Yuan W Z. Flexible focusing pattern realization of centimeter-scale planar super-oscillatory lenses in parallel fabrication [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(1): 311-320.
- [12] Li W L, He P, Yuan W Z, et al. Efficiency-enhanced and sidelobe-suppressed super-oscillatory lenses for sub-diffraction-limit fluorescence imaging with ultralong working distance [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(13): 7063-7071.
- [13] Liu T, Tan J B, Liu J, et al. Vectorial design of super-oscillatory lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15090-15101.
- [14] Liu T, Wang T, Yang S M, et al. Rigorous electromagnetic test of super-oscillatory lens [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32139-32148.

- [15] Liu T, Yang S M, Jiang Z D. Electromagnetic exploration of far-field super-focusing nanostructured metasurfaces[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16297-16308.
- [16] Liu T. Research on vectorial diffraction far-field super-resolution focusing related theory and confocal microscopic imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 68-74.
刘涛. 矢量衍射远场超分辨聚焦相关理论及共焦显微成像研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 68-74.
- [17] Huang K, Liu H, Garcia-Vidal F J, et al. Ultrahigh-capacity non-periodic photon sieves operating in visible light[J]. Nature Communications, 2015, 6: 7059.
- [18] Ni H B, Yuan G H, Sun L D, et al. Large-scale high-numerical-aperture super-oscillatory lens fabricated by direct laser writing lithography[J]. RSC Advances, 2018, 8(36): 20117-20123.
- [19] Qin F, Huang K, Wu J F, et al. Asupercritical lens optical label-free microscopy: sub-diffraction resolution and ultra-long working distance[J]. Advanced Materials, 2017, 29(8): 1602721.
- [20] Yu Y T, Li W L, Li H Y, et al. An investigation of influencing factors on practical sub-diffraction-limit focusing of planar super-oscillation lenses[J]. Nanomaterials, 2018, 8(4): 185.
- [21] Ruan D S. Study on terahertz sub-diffraction focusing planar lens based on optical super-oscillation[D]. Chongqing: Chongqing university, 2018: 46-50.
阮德圣. 基于超振荡技术的太赫兹超衍射聚焦平面透镜研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 46-50.
- [22] Cai Y L, Deng X W, Tang D F, et al. Application and key technology research of sub-micron grating exposure system[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2019, 48(1): 33-36, 59.
蔡颖岚, 邓学文, 唐代飞, 等. 亚微米光栅曝光系统的应用及设备关键技术研究[J]. 电子工业专用设备, 2019, 48(1): 33-36, 59.
- [23] Liu T, Yang S M, Jiang Z D. Optimization design method for electromagnetic focusing micro-structured metallic-film multi-annular plates[J]. Acta Metrologica Sinica, 2016(4): 337-341.
刘涛, 杨树明, 蒋庄德. 微结构金属膜环带片电磁聚焦优化设计方法[J]. 计量学报, 2016(4): 337-341.
- [24] An C, Chu J K, Zhang R. Optimization of bilayer sub-wavelength metallic grating based on genetic algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 220501.
安超, 褚金奎, 张然. 基于遗传算法的双层亚波长金属光栅优化[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 220501.