

激光照明条件对超振荡平面透镜聚焦性能的影响*

刘康 何韬 刘涛[†] 李国卿 田博 王佳怡 杨树明[‡]

(西安交通大学, 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2020年4月19日收到; 2020年5月30日收到修改稿)

超振荡平面透镜 (super-oscillatory lens, SOL) 是近几年出现的新型平面光学元件, 基于矢量角谱理论设计了振幅型和相位型 SOL, 采用时域有限差分法对衍射聚焦光场进行严格电磁仿真计算, 研究发现: 当照明激光束腰半径 w_0 小于 SOL 半径 a 时, 超衍射极限聚焦能力明显下降, 聚焦光斑强度衰减超过 50%; 束腰半径 w_0 对相位型 SOL 影响更剧烈, 且会发生显著正向焦移; 当 w_0 不小于 $2a$ 时可获得接近理想的聚焦特性. 倾斜照明条件下, 大数值孔径振幅型 SOL 一般允许的倾斜角度小于 10° , 而相位型 SOL 具有宽广的倾角适应性 (可超过 40°), 聚焦光斑会发生横向展宽, 且强度急剧下降. 大数值孔径 SOL 对无限远点物成像会产生显著的负畸变和波动变化的场曲, 小数值孔径 SOL 在宽视场范围内则无畸变. 本文研究结果为 SOL 在超衍射极限聚焦、超分辨显微成像、飞秒激光直写微纳加工等领域的实际应用提供重要理论支撑.

关键词: 聚焦, 衍射, 微纳结构, 时域有限差分法**PACS:** 42.79.-e, 42.25.-p, 42.25.Bs, 42.25.Ja**DOI:** 10.7498/aps.69.20200577

1 引言

为了实现远场亚波长聚焦和超分辨成像, 英国南安普顿大学于 2012 年首次提出了超振荡透镜 (super-oscillatory lens, SOL)^[1], 作为一种新的平面光学元件, 其基本原理是利用微纳环带结构实现多光束衍射, 并由相干光场的精细干涉叠加在光学远场区域获得亚波长尺寸的聚焦光斑^[1,2]. SOL 是一种微纳同心圆环结构, 与常规的同心圆环光瞳滤波器 (或称 Toraldo 光瞳滤波器)^[3,4], 工作原理截然不同, 前者是利用光的衍射对光场直接聚焦, 后者必须工作于透镜或物镜系统中. SOL 是一种随机优化产生的平面光学元件^[1,2,5,6], 与熟知的菲涅耳波带片^[7,8] 也存在明显区别, 后者是利用波带法直接构造的疏密有致的同心圆环结构. 根据光场调

制参数的不同, SOL 可分为振幅型、相位型和复振幅型, 振幅和相位调制分别通过刻蚀金属膜和透明介质材料实现. 由于 SOL 具有结构轻薄、易于实现亚波长聚焦和衍射光场定制设计的突出优点, 近几年受到广泛的关注^[5,6,9-12]. 主要包括广泛深入的优化设计方法研究^[1,5,9-11], 和基于 SOL 的超分辨成像应用研究^[1,13-15]. 对于引入加工误差后 SOL 聚焦性能变化的研究较少, 西安交通大学分析了金属膜的材料和厚度以及照明激光波长对 SOL 聚焦特性的影响^[16,17]; 西北工业大学初步研究了 SOL 环带宽度误差和环带侧壁倾斜度对聚焦性能的影响^[18]; 东南大学基于激光直写技术利用视场拼接的办法加工了大口径 SOL 并分析了拼接误差对聚焦性能的影响^[19].

目前为止, 激光照明条件对 SOL 聚焦性能的影响尚未见相关研究报道, 尚不清楚 SOL 实际应

* 国家自然科学基金优秀青年科学基金 (批准号: 51722509)、国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB1104700) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2020SF-170) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liu8483@xjtu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

用中照明光源振幅分布、倾斜、安装偏差等客观条件下 SOL 聚焦性能如何变化, 这些情形都偏离了 SOL 优化设计的基本假设条件^[1,2,9,10], 目前研究也尚未揭示 SOL 对无限远物点成像的像差分布. 本文结合矢量角谱 (vectorial angular spectrum, VAS) 理论和遗传算法 (genetic algorithm, GA), 在激光均匀照明、垂直入射条件下优化设计典型 SOL, 重点基于时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 对衍射光场进行严格电磁仿真计算, 通过大量的 FDTD 定量计算研究揭示实际应用中激光照明条件对 SOL 聚焦特性的影响规律, 并研究揭示离轴倾斜照明 (或无限远点物成像) 条件下的畸变和场曲像差分布特性, 研究结果将为 SOL 在当前超分辨聚焦、显微成像、微纳光刻等领域的广泛工程应用奠定坚实的理论基础.

2 SOL 设计

当矢量偏振光束垂直照射 SOL 表面时, 其衍射聚焦过程如图 1 所示. 根据 VAS 理论, 如果已知 SOL 后表面处的横向电场分布, 则 SOL 之后空间中任意一点的电场分布均可由 VAS 积分表达式计算得到^[20], 而 SOL 后表面的电场分布近似等于入射场与 SOL 衍射孔径标量透过率函数的乘积^[1,2,5,6,9]. 根据 VAS 理论对任意典型偏振态激光光束的衍射传播过程进行积分描述, 再设定需求目标对衍射光场进行单目标或多目标约束, 建立数学优化模型, 进而通过优化算法 (如 GA 算法^[2]或粒子群优化算法^[1]) 反复迭代计算, 可以优化设计出性能满足 (或接近) 设计需求的 SOL 结构^[1,2,5,6,9].

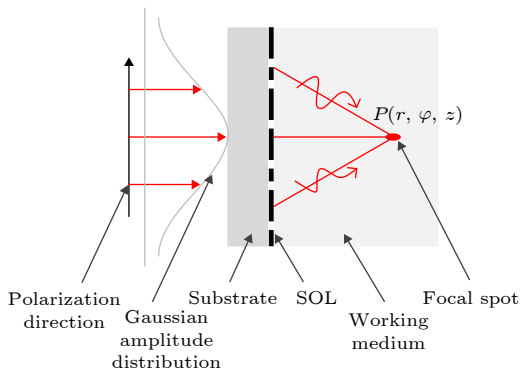


图 1 SOL 衍射聚焦示意图

Fig. 1. Schematic diagram of diffraction focusing of SOL.

针对最典型的线偏振光 (偏振方向设为沿 X 方向), 基于 VAS 理论导出的积分公式^[2,9], 利用 GA 算法和快速汉克尔变换算法^[9,16], 分别优化设计出三组振幅型和相位型的 SOL 结构, 参数见表 1. 其中, 照明激光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 光源垂直入射, 振幅设为均匀分布. SOL 工作介质为空气, SOL 的最大外径为 D , 设计焦距为 f_{sol} , 环带最小径向宽为 Δr , NA 是 SOL 的数值孔径 ($NA = \sin \alpha$, α 是最大会聚半角). SOL 的几何结构用每个环带的外环半径值 r_i 表示 ($i = 1, 2, \dots, N$, N 是最大环带数), 每个环带的透过率用 t_i 表示, 其中振幅型 SOL 的透过率“1”和“0”分别表示该环带是透光和不透光, 而相位型 SOL 的相位调制量为 $\psi = 0, \pi/2$ 或 π , 对应 $t_i = \exp(j\psi)$ 等于“1”, “j”和“-1” (j 是虚数单位). 第 3 节将基于典型 SOL 结构 (SOL₁₋₆) 采用严格电磁仿真方法——FDTD 进行计算分析.

3 激光照明条件对 SOL 的影响

3.1 激光振幅分布的影响

针对振幅型 SOL₁ 和相位型 SOL₂ (见表 1), 分别采用束腰半径 $w_0 = 2a, a, 2a/3, a/2$ 的高斯光束进行照明, 其中 a 为 SOL 的半径 ($a = D/2$), 高斯光束振幅分布 (设在 SOL 衍射孔径平面内) 表示为

$$g(r) = A_0 \exp(-r^2/w_0^2), \quad (1)$$

其中 A_0 是光束中心处的幅度. 利用 FDTD 三维严格电磁仿真, 振幅型 SOL₁ 采用 100 nm 厚的铝膜作为光的遮挡介质^[1,16,21], 相位型 SOL₂ 的相位调制介质采用 Si_3N_4 材料, 在 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 波长下 Si_3N_4 的折射率为 1.91^[22], 通过对 Si_3N_4 层的刻蚀产生深度为 348 nm 的沟槽进行相位 π 的调制. FDTD 采用完全匹配层 (perfectly matched layer, PML) 作为吸收边界, 设置总场散射场 (total-field scattered-field, TFSF) 光源边界, FDTD 仿真区域网格划分为 $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ (x, y, z), 更精细的网格划分可提高计算精度, 但同时对计算机存储空间的需求迅速增大.

振幅型 SOL₁ 仿真计算得到的衍射场沿轴光强分布和焦平面内垂直于偏振方向的光强分布如图 2 所示, 其中束腰半径 $w_0 = \infty$ 对应均匀平面

表 1 优化设计的 SOL 结构参数
Table 1. Structural parameters of optimized SOL.

| SOL | 类型 | $\Delta r/\mu\text{m}$ | $D/\mu\text{m}$ | $f_{\text{sol}}/\mu\text{m}$ | NA | $r_i/\mu\text{m}$ | t_i |
|------------------|----|------------------------|-----------------|------------------------------|------|--|---|
| SOL ₁ | 振幅 | 0.2 | 16 | 3.5 | 0.92 | [0.2, 0.4, 1.0, 1.2, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 3.2, 3.6, 3.8, 4.0, 4.2, 4.6, 4.8, 5.2, 5.4, 6.0, 6.4, 6.8, 7.0, 7.4, 7.6, 8.0] | [0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1] |
| SOL ₂ | 相位 | 0.2 | 16 | 3.5 | 0.92 | [0.2, 0.6, 1.0, 1.2, 1.6, 1.8, 2.0, 2.4, 3.0, 3.2, 4.8, 5.0, 5.4, 5.8, 6.2, 6.6, 6.8, 7.2, 7.4, 8.0] | [-1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1] |
| SOL ₃ | 相位 | 0.2 | 10 | 2.0 | 0.93 | [0.473, 0.885, 1.458, 1.969, 2.382, 2.842, 3.044, 4.239, 4.745, 5.000] | [1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j] |
| SOL ₄ | 相位 | 0.2 | 10 | 9.9 | 0.45 | [0.268, 0.468, 1.165, 1.365, 1.734, 3.189, 3.399, 4.278, 4.792, 5.000] | [j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j, 1, j] |
| SOL ₅ | 振幅 | 0.2 | 10 | 1.9 | 0.93 | [0.600, 0.899, 1.915, 2.190, 2.440, 3.756, 4.076, 4.357, 4.769, 5.000] | [0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1] |
| SOL ₆ | 振幅 | 0.2 | 10 | 10.1 | 0.44 | [0.300, 0.506, 1.248, 1.460, 1.660, 2.885, 3.085, 3.335, 3.755, 4.094, 4.294, 5.000] | [0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1] |

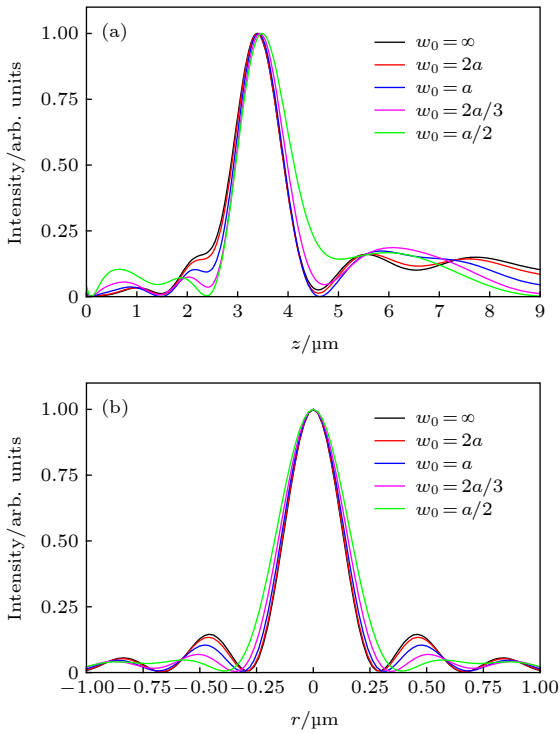


图 2 SOL₁ 的聚焦光场 FDTD 计算结果 (a) 轴向光强分布; (b) 焦平面内横向光强分布 (Y 方向)
Fig. 2. Focused light field of SOL₁ by FDTD simulation: (a) On-axis intensity distribution; (b) transverse intensity distribution in the focal plane (Y-direction).

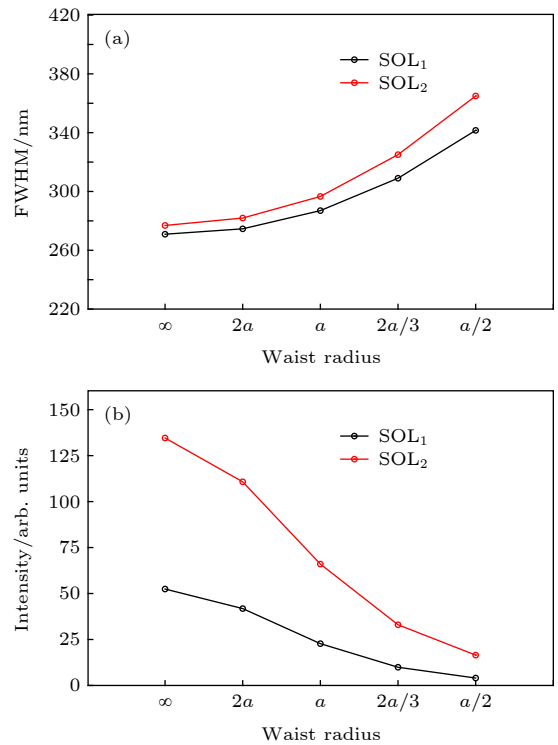


图 3 SOL 聚焦性能变化 (FDTD) (a) 光斑横向尺寸; (b) 光斑中心强度
Fig. 3. Focusing performance of SOL (FDTD): (a) Transverse size; (b) central intensity.

波. 从图 3(a) 可见, 光源束腰半径 w_0 由 ∞ 减小至 $a/2$ 时, 聚焦光斑的横向半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 逐渐展宽. 当高斯光的束腰半径 w_0 大于 SOL 的半径 a 时, 聚焦光斑的 FWHM 仅展宽了 1.4%, 光斑强度衰减为等幅度均匀平面波时的 43.3%; 而当束腰半径 w_0 小于 SOL 衍射孔半径 a 时, 聚焦光斑由 287 nm ($0.42\lambda/NA$, $w_0 = a$) 迅速展宽为 341 nm ($0.50\lambda/NA$, $w_0 = a/2$), 光

斑尺寸增大了 19%, SOL 的超衍射极限聚焦的能力逐渐下降 (标量衍射理论框架下, 艾里斑的 FWHM 为 $0.51\lambda/NA$), 同时聚焦光斑的光场强度急剧下降, 仅为原来的 18%, 如图 3(b) 所示.

类似于振幅型 SOL₁, 相位型 SOL₂ 的聚焦光斑同样随着照明高斯光束的束腰半径的减小而逐渐展宽, 光斑强度迅速减弱, 如图 3 和图 4 所示. 相位型 SOL₂ 的光强分布变化更为剧烈, 照明光束

的振幅分布对其影响更大,特别是当束腰半径 w_0 由 a 减小到 $a/2$ 时,轴向光斑的旁瓣显著增强,并且伴随着显著的轴向正向焦移 (160 nm), 横向光斑的 FWHM 由 297 nm 展宽为 365 nm, 尺寸增大了 23%, 光斑强度也减弱为原来的 25%. 而当高斯光束的束腰半径 $w_0 = a$ 时, 横向光斑的 FWHM 仅展宽了 7.2%, 光斑强度衰减为均匀照明时的 49%.

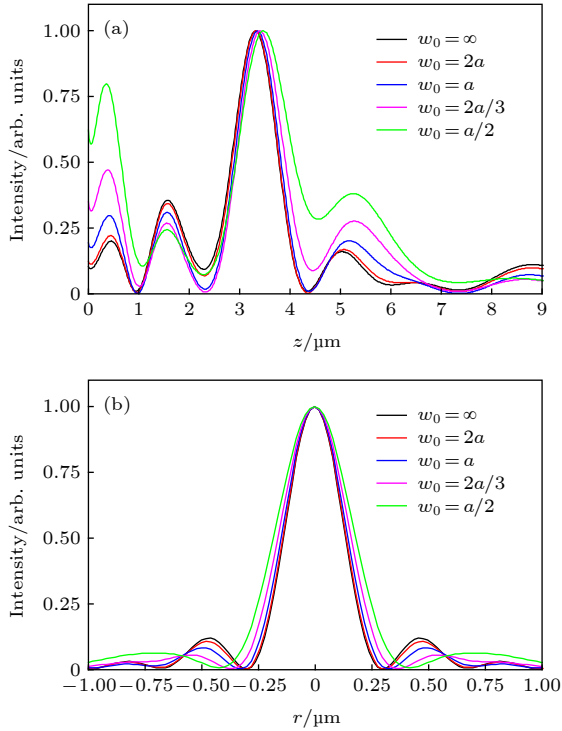


图 4 SOL_2 的聚焦光场 FDTD 计算结果 (a) 轴向光强分布; (b) 焦平面内横向光强分布 (Y 方向)
 Fig. 4. Focused light field of SOL_2 by FDTD simulation: (a) On-axis intensity distribution; (b) transverse intensity distribution in the focal plane (Y-direction).

从 SOL_1 和 SOL_2 的 FDTD 仿真计算结果不难发现, 对于均匀照明条件下优化设计的 SOL, 若采用高斯光束进行照明使用 (实际情形), 无论是振幅型还是相位型 SOL, 聚焦光斑的分布总体仍然保持了一致的单焦点特性, 但激光的束腰半径会对 SOL 聚焦性能产生显著影响, 强度和光斑尺寸在 $w_0 \geq D$ (即 $w_0 \geq 2a$) 时接近理想设计情形. 当束腰半径 w_0 减小至 SOL 半径 a 时, 聚焦光斑尺寸明显展宽, 而光斑强度衰减超过 50%, SOL 聚焦光斑的分布影响相对较小. 当束腰半径 w_0 小于 SOL 半径 a 后, 不仅聚焦光斑尺寸会发生显著扩展, 超衍射极限聚焦能力明显下降, 特别对于相位型 SOL 还会出现显著的正向焦移现象, 光斑的轴向旁瓣也

会明显退化.

当前大多数微纳光学研究使用的 SOL 半径在几十至百微米量级 [1,5,9–11], 由于实际激光光束的束腰半径都在亚毫米至毫米 (准直扩束后可增大至数毫米至厘米量级), 远大于 SOL 的半径, 因此实际照明情形可按均匀平面波对待. 但为了与常规的光学元件配合使用以及提高 SOL 的光能利用率, 需要设计毫米级甚至厘米级的大口径 SOL [18,19], 此时 SOL 的衍射半径已经等于或大于照明激光束腰半径, 激光光源的振幅分布特性对 SOL 聚焦光斑的影响变得尤为显著. 因此, 如果光源束腰半径与 SOL 半径相近或更小时, 必须将高斯光束振幅分布代入优化设计过程, 对 SOL 进行更加精准的优化设计.

进一步地对 X 方向线偏振照明的 SOL 聚焦光斑矢量特性进行研究, 以 SOL_1 为例, 在均匀平面波和 $w_0 = a/2$ 高斯光照明条件下焦平面各电场分布如图 5 所示. 可以看到平面波入射条件下聚焦光斑中电场 E_z 和 E_y 分量在电场总场中的比重较大, 导致聚焦光斑呈扁椭圆形; 而高斯光照明条件下 SOL 聚焦光斑的 E_z 和 E_y 分量却相对较小, 对合成光斑的分布影响减弱, 光斑最终呈轻微椭圆状. 通过分析不难发现, 由于采用高斯光束进行 SOL 照明时, 对聚焦光斑 E_z 和 E_y 分量贡献最大的外环结构接收到的激光照明强度大大降低, 因此聚焦光斑中的电场 E_z 和 E_y 分量减小而 E_x 成为最主要的分量, 合成光斑将在 E_x 分布基础上沿着照明光偏振方向轻微展宽.

除了最常见的高斯平面波, 进一步对空心高斯光束 [23] 和贝塞尔-高斯 (Bessel-Gaussian, BG) 光束 [9] 等不同振幅分布照明光源条件下的 SOL 聚焦特性进行了分析.

首先基于 VAS 理论对 X 方向线偏振空心高斯光束照明条件下的 SOL 聚焦光场分布进行了计算, 发现随着光束空心半径的增大焦平面光斑的 E_z 和 E_y 分量占比急剧上升, 呈明显的“哑铃”形分布; 而光场轴向分布则逐渐展宽呈不均匀的“光针”状, 这样的变化与对 SOL 进行中心遮挡空间滤波情形类似 [24].

其次采用典型的 BG 振幅分布的径向偏振态光束, 针对 SOL_1 和 SOL_2 进行矢量衍射计算, 振幅服从 [9]

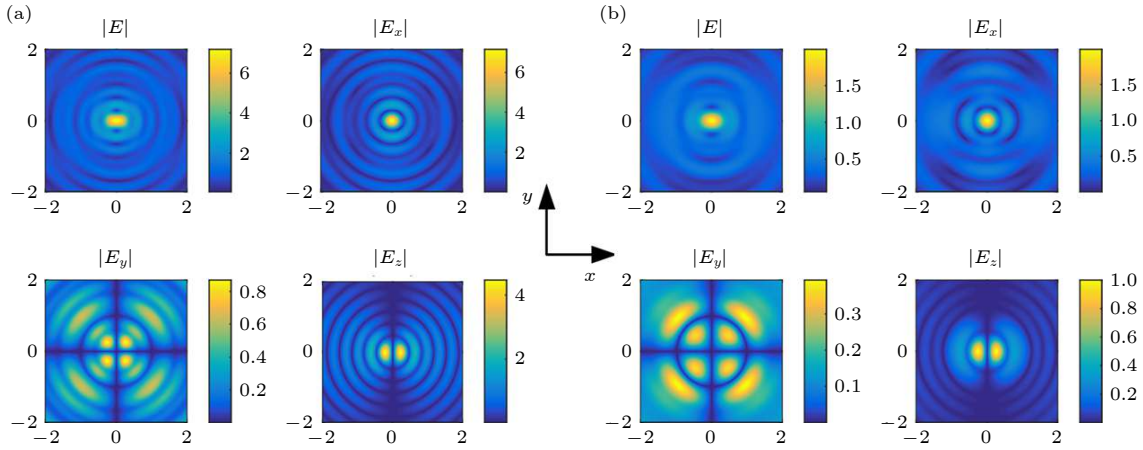


图 5 SOL₁ 聚焦光斑电场分布的 FDTD 结果 (a) 均匀平面波照明; (b) $w_0 = a/2$ 的高斯光束照明

Fig. 5. Electric field distribution of SOL₁ by FDTD simulation: (a) Uniform plane beam illumination; (b) $w_0 = a/2$ Gaussian beam illumination.

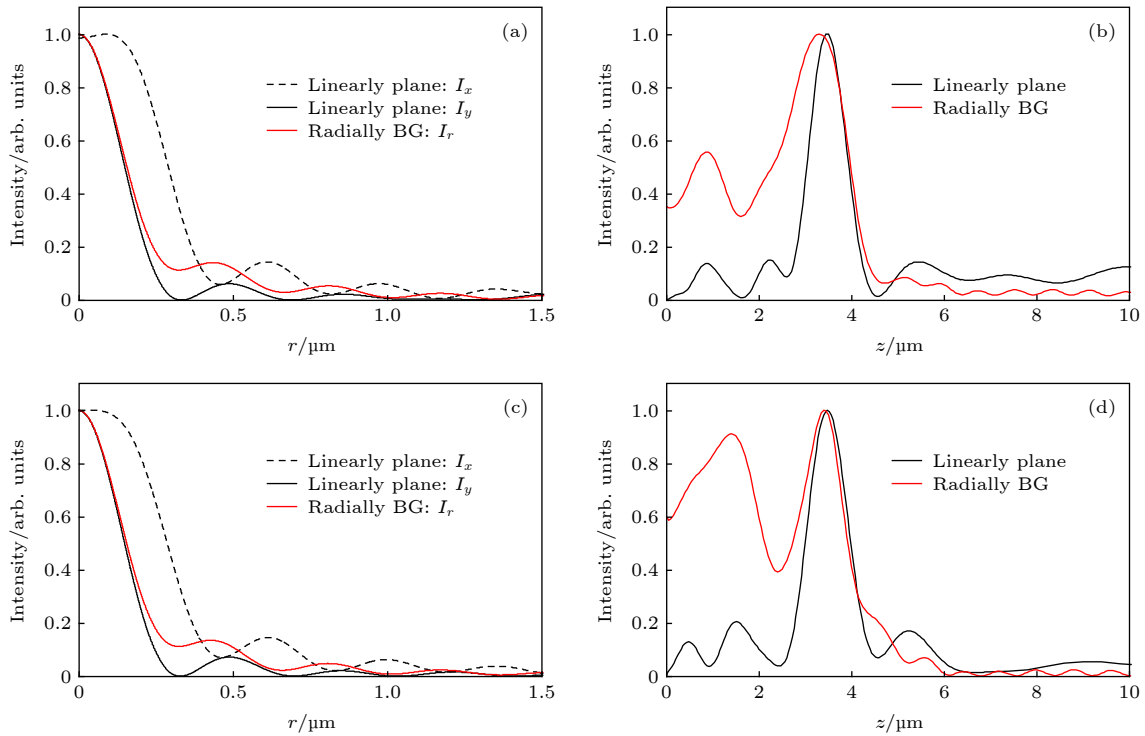


图 6 BG 径向偏振光束照明条件下 SOL 聚焦光场的 VAS 计算结果 (a), (b) SOL₁; (c), (d) SOL₂

Fig. 6. Focused light intensity of SOL by VAS calculation under BG radially polarized illumination: (a), (b) SOL₁; (c), (d) SOL₂.

$$g(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) J_1\left(2\frac{r}{w_0}\right), \quad (2)$$

其中 J_1 为第一类一阶贝塞尔函数. 设高斯束腰半径等于 SOL₁ 半径 ($w_0 = 8 \mu\text{m}$), 基于 VAS 理论进行聚焦光场计算, 结果如图 6 所示. 可见, 采用径向偏振 BG 光束照明的 SOL, 聚焦光斑横向尺寸与 X 线偏振均匀平面光照条件下的 Y 向光斑尺寸大小接近且略微偏大, 而光斑轴向分布严重变

形, 根本原因是这里使用的 SOL 是采用线偏振光设计的, 如果改为径向偏振光照则其聚焦性能不能达到最优, 此时应该在径向偏振光照条件下重新优化设计^[9].

3.2 激光倾斜照明的影响

SOL 对有一定倾斜角度 (倾角) 的单色相干平行光束直接聚焦 (等价于对轴外无穷远物点进行衍

射聚焦成像), 或者可将 SOL 用作管镜进行无限远物点的光学成像, 如图 7 所示. 此外, 由于装调误差等原因也可能导致入射光束方向与 SOL 元件表面的法线方向存在一定的夹角, 如图 8 所示. 这些都偏离了目前 SOL 的设计基本条件要求, 即均假设单色激光垂直照明, 此时 SOL 是否依旧能有效聚焦, 或者对倾斜平行光有一定的视场角范围, 以及聚焦光斑分布会如何变化, 将直接影响 SOL 的实际应用.

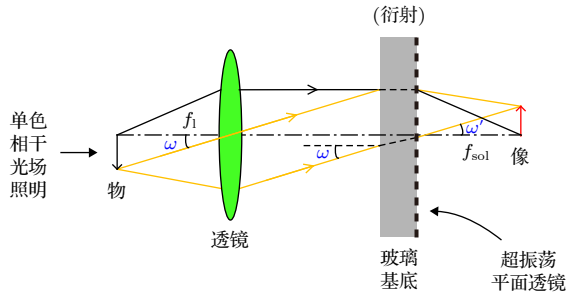


图 7 SOL 对倾斜平行光的衍射聚焦成像示意图

Fig. 7. Schematic diagram of diffraction focused imaging by SOL under oblique illumination.

首先对振幅型 SOL 在倾斜入射下的聚焦性能进行了初步研究, 发现振幅型 SOL 对入射光束倾角 (偏转角度) 十分敏感. 图 9 为振幅型 SOL 的倾斜照明 FDTD 聚焦计算结果, 其中大数值孔径 SOL₅ (NA = 0.93) 的聚焦光斑在倾斜角度 $\omega = 12^\circ$ 时出现了明显的弥散现象, 而在 $\omega = 15^\circ$ 时失去聚焦能力; 小数值孔径 SOL₆ (NA = 0.44) 在

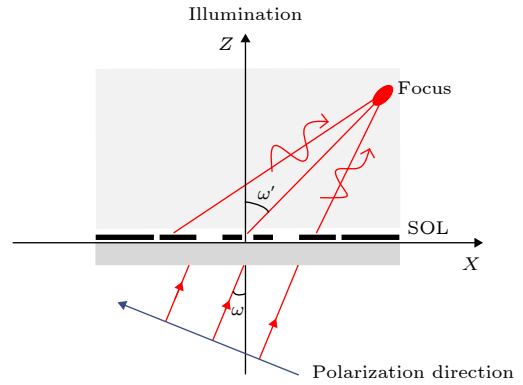


图 8 倾斜平行光照明的 SOL 衍射聚焦示意图

Fig. 8. Schematic diagram of diffraction focusing by SOL under oblique illumination.

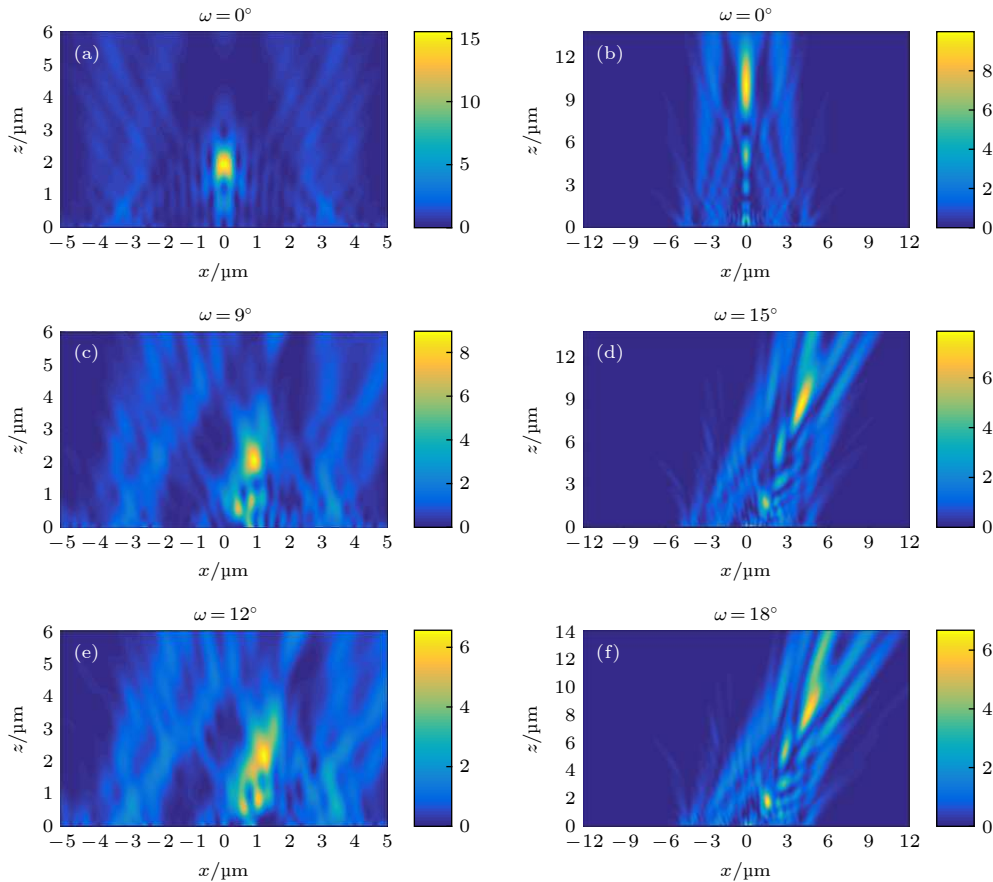


图 9 振幅型 SOL 的倾斜照明 FDTD 聚焦计算结果 (a), (c), (e) SOL₅; (b), (d), (f) SOL₆

Fig. 9. Focusing results of amplitude-type SOL under oblique illumination: (a), (c), (e) SOL₅; (b), (d), (f) SOL₆.

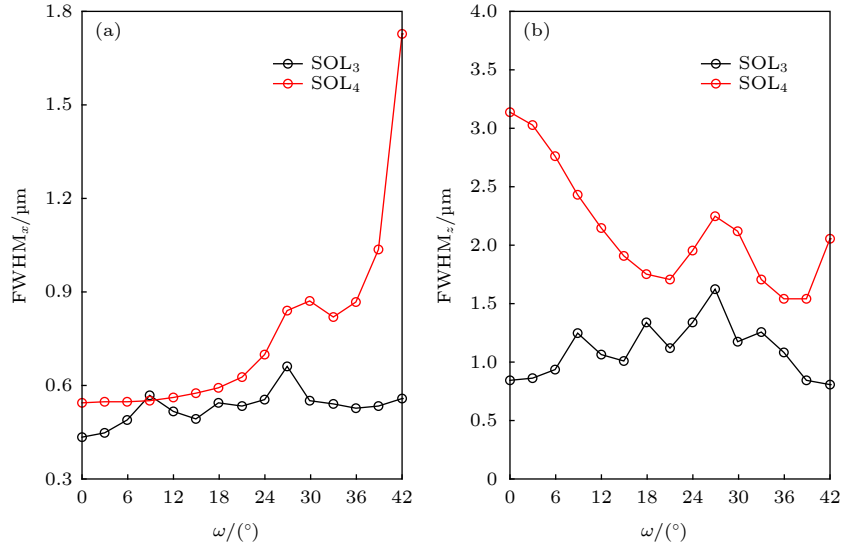

 图 10 倾斜照明 SOL 的聚焦光斑尺寸 (a) $FWHM_x$; (b) $FWHM_z$

 Fig. 10. Focal spot size of SOL under oblique illumination: (a) $FWHM_x$; (b) $FWHM_z$.

$\omega = 18^\circ$ 倾斜照明条件下光斑出现显著变形, 在 $\omega = 21^\circ$ 时光斑严重退化, 此时 SOL 失去对该倾角平行光束的良好聚焦. 总体而言, 振幅型 SOL 聚焦性能严重依赖于照明光束倾角大小, 一般仅允许相对较小角度 ($\omega \leq 10^\circ$) 的倾斜照明, 小数值孔径 SOL 具有相对较弱的倾角依赖性.

相比之下, 相位型 SOL 则可以在较大角度的倾斜照明条件下进行光束聚焦, FDTD 仿真计算结果显示, 在倾斜角度最大达到 $\omega = 42^\circ$ 时相位型 SOL_3 和 SOL_4 仍然能够实现良好聚焦, 远大于振幅型 SOL 允许的入射倾角大小. 除了对入射光倾角角度具有更高的适应性, 相位型 SOL 的聚焦效率以及对入射光场调制的灵活性等也远优于振幅型 SOL, 有望在未来获得更广泛的使用, 因此, 下面针对相位型 SOL 进行详细比较分析, 包含大数值孔径和小数值孔径 SOL 两类.

对于 $NA = 0.93$ 的相位型 SOL_3 和 $NA = 0.45$ 的相位型 SOL_4 , 将平行光束进行间隔为 3° 的等间距倾斜 ($\omega = 0^\circ - 42^\circ$), 对聚焦光场分别进行 FDTD 严格电磁仿真计算. FDTD 仿真模型中 SOL 的相位调制层采用 SiO_2 材料, 在 632.8 nm 波长下折射率为 1.457, 通过对 SiO_2 层的刻蚀, 产生深度为 346 nm 的沟槽进行相位 $\pi/2$ 的调制. 仿真采用 PML 边界条件、TFSF 光源, 仿真区域网格划分为 $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ (x, y, z).

首先以聚焦光斑中强度最高的点作为焦点

中心, 定量统计聚焦光斑的横向和轴向尺寸 ($FWHM_x$ 和 $FWHM_z$), 如图 10 所示. 随着入射激光倾斜角度的逐步增加, SOL_3 聚焦光斑的横向和轴向尺寸波动较大, 光斑的横向尺寸大致呈增大趋势, 轴向尺寸则呈现先增大后减小的变化趋势, 其中光斑横向 FWHM 最大展宽了 52%, 而光斑轴向尺寸波动更为明显, 最大展宽达到了 94%. 对于小数值孔径的 SOL_4 , 光斑的横向和轴向 FWHM 变化则呈现出一定的规律: 当倾斜角度处于 18° 以内时, 光斑的 $FWHM_x$ 保持着较高的稳定性, 倾斜角度达到 18° 时聚焦光斑也仅有 47 nm 的展宽, 光斑的 $FWHM_z$ 则随着倾斜角度的增加逐步减小且整体呈现一定的线性关系; 当倾斜角度超过 18° 后, 光斑的横、轴向尺寸均开始出现明显波动, 并且在 42° 的倾斜角度下光斑的横向尺寸出现急剧变化, SOL 的聚焦能力退化严重.

其次, 聚焦光斑强度也随着倾斜角度的增大而出现显著下降, 如图 11 所示. 对于大数值孔径的 SOL_3 , 倾斜角度在 $0^\circ - 9^\circ$ 的变化过程中, 光斑强度急剧衰减了 61%, 而在倾斜角度达到 18° 以后光斑的强度衰减逐渐趋于平缓, 总体处于较低水平. 对于小数值孔径的 SOL_4 , 与前述光斑尺寸一样, 光斑强度在 18° 以内的倾斜入射角度下能够保持较高稳定性, 最高仅衰减了 11%, 而在 18° 以后光斑强度变化开始变得较为明显, 到 42° 的倾斜角度时强度衰减已经达到了 69%.

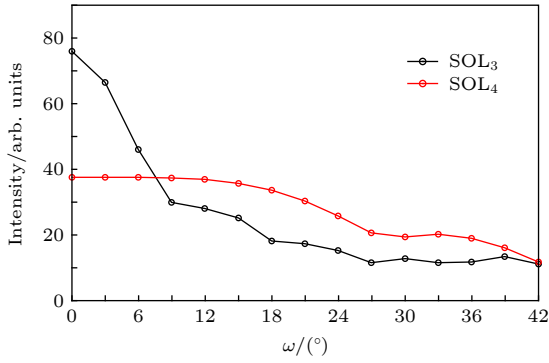


图 11 不同照明角度下 SOL 的聚焦光斑强度

Fig. 11. Focal intensity of SOL varying with oblique illumination angle.

3.3 无限远物点成像的畸变和场曲

对聚焦光斑的位置进行了定量统计分析,发现在倾斜角度 ω 小于 18° 范围内 SOL₃ 的聚焦光斑倾斜角度位置 ω' 与入射激光倾斜角度 ω 存在较好的线性关系,如图 12(a) 所示,经最小二乘拟合后该线性斜率为 2.03,拟合均方根误差为 1.077. 进一步对 SOL₃ 的出射、入射角度的正切之比 $\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega}$ 进行计算,发现该比值随着倾斜角度的增加而逐渐减小,如图 12(b) 所示,而 Γ 表示图 7 所示成像系统的垂轴放大率的调制系数,该调制系数随入射角度变化则意味着 SOL₃ 不同的垂轴位置具有不同的放大倍数 β ,可利用下式表示:

$$\beta = \frac{f_{\text{sol}} \tan \omega'}{f_1 \tan \omega} = \Gamma \frac{f_{\text{sol}}}{f_1}. \quad (3)$$

因此像面会产生畸变. 对于 SOL₃, 当倾斜角度 ω 小于 18° 时,利用正切倍角公式,得到

$\Gamma \approx 2/(1 - \tan^2 \omega)$, 即可以通过入射角估算出垂轴放大倍数 β . 对于小数值孔径的 SOL₄, 聚焦光斑的角度位置 ω' 与入射角 ω 之间的线性关系更为明显,倾斜角度 ω 在 $0^\circ - 27^\circ$ 的角度范围内,最小二乘拟合的线性斜率为 1.15,拟合均方根误差为 0.142 (对应微小畸变),比值 Γ 保持良好的一致性,显示出远比 SOL₃ 好的规律性,根据 (2) 式,此时具有类似透镜成像系统,垂轴放大倍数为常数 (无畸变).

利用 (2) 式,结合折射透镜光学系统中相对畸变的定义 [25],以小角度 (本文可取 3°) 对应的实际垂轴放大倍率为基准,则相对畸变

$$q' = \frac{\beta_{\text{实}} - \beta_{\text{理}}}{\beta_{\text{理}}} \times 100\%. \quad (4)$$

显然由图 12(b) 可知, $q' < 0$ (负畸变), 对应桶形畸变.

由聚焦光斑在横向和轴向位置的变化可以得到 SOL 聚焦产生的场曲和畸变 (针对无限远物体成像), 轴向和横向位置分别用 X_f 和 Z_f 表示,类似于单色几何像差折射透镜系统的分析,以激光垂直入射时焦点所在的平面为基准面, SOL₃ 和 SOL₄ 在 XZ 平面 (子午平面) 的场曲曲线如图 13 所示,随着入射激光倾斜角度的增大,场曲逐渐增大,在倾斜角度分别达到 18° 和 27° 过后,两者的场曲开始出现明显波动,场曲的存在意味着聚焦像点 (或离轴焦点) 的轴向位置会发生明显的移动.

根据上述两种数值孔径 SOL 的仿真结果和分析,可以发现虽然在 $0^\circ - 42^\circ$ 的倾斜角度范围内两者均能保持聚焦功能,但聚焦性能完全不同; 大数

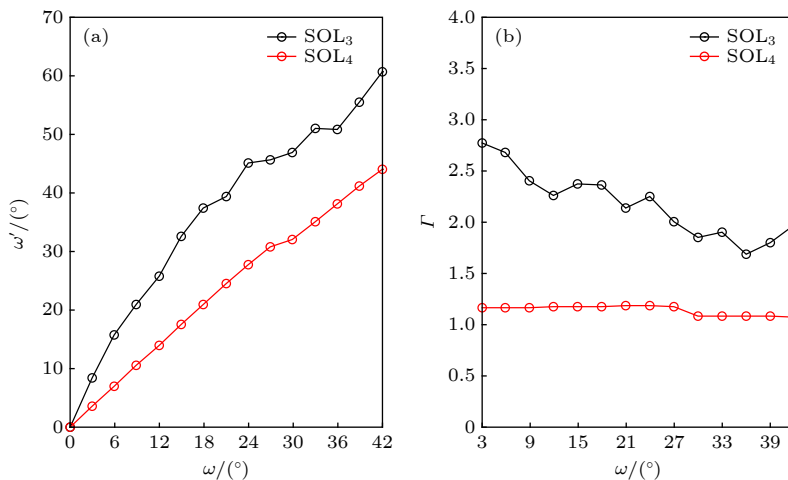
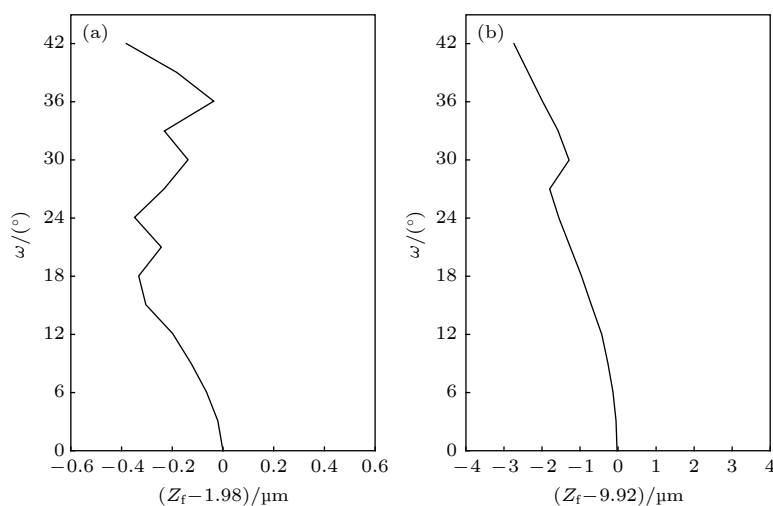


图 12 聚焦光斑角位置变化 (a) $\omega - \omega'$ 关系曲线; (b) $\omega - \Gamma$ 关系曲线

Fig. 12. Angle position of focusing spot: (a) $\omega - \omega'$; (b) $\omega - \Gamma$.

图 13 SOL 的场曲 (a) SOL₃; (b) SOL₄Fig. 13. Field curvature of SOL: (a) SOL₃; (b) SOL₄.

值孔径的 SOL₃ 对照明光的倾斜角度比较敏感, 即便在较小的倾斜角度, 聚焦光斑的横、纵向尺寸、光强等都会出现明显的波动和降低, 小数值孔径的 SOL₄ 则在一定的倾斜角度内表现出了良好的稳定性, 在 18° 的范围内不论是光斑的横纵向尺寸、强度、角度位置还是场曲和畸变等像差都表现出了良好的稳定性.

4 结 论

本文基于 VAS 理论设计了多组典型的 SOL, 重点采用 FDTD 严格电磁仿真计算分析激光照明条件 (振幅分布、倾斜角度等) 对 SOL 聚焦的影响. 仿真和分析结果表明, 在照明高斯光束的束腰半径大于 SOL 半径 ($w_0 \geq D$) 时, 振幅型和相位型 SOL 的聚焦性能均接近理想情形, 而当束腰半径小于 SOL 半径 ($w_0 < D/2$) 时聚焦光斑迅速展宽, 且相位型 SOL 还出现了显著焦移和轴向旁瓣增强. 大数值孔径振幅型 SOL 对照明光束的倾斜敏感, 仅允许几度的倾角; 大数值孔径相位型 SOL 允许较为宽广的倾斜角度范围, 但聚焦光斑尺寸和强度对入射激光的倾斜角度极为敏感, 即便几度的倾角下聚焦光斑强度也会产生迅速降低, 且存在较大的场曲和负畸变. 相比之下, 小数值孔径相位型 SOL 聚焦光斑的尺寸、强度、角度位置和场曲、畸变等能够保持较高的稳定性, 这表明小数值孔径 SOL 对照明激光倾斜误差的容忍性更高, 其安装使用条件相比大数值孔径 SOL 较为宽松, 同时也可以用于一些需要倾斜照明的场合下.

参考文献

- [1] Rogers E T F, Lindberg J, Roy T, Savo S, Chad J E, Dennis M R, Zheludev N I 2012 *Nat. Mater.* **11** 432
- [2] Liu T 2013 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [刘涛 2013 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [3] Francia G T D 1952 *IL Nuovo Cimento* **9** 426
- [4] Qiu L R 2005 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [邱丽荣 2005 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [5] Diao J S, Yuan W Z, Yu Y T, Zhu Y C, Wu Y 2016 *Opt. Express* **24** 1924
- [6] Wu J, Wu Z X, He Y G, Yu A P, Zhang Z H, Wen Z Q, Chen G 2017 *Opt. Express* **25** 6274
- [7] Liu T, Tan J B, Liu J, Wang H T 2013 *Opt. Lett.* **38** 2742
- [8] Liu T, Liu Q, Yang S M, Jiang Z D, Wang T, Zhang G F 2017 *Appl. Opt.* **56** 3725
- [9] Liu T, Tan J B, Liu J, Wang H T 2013 *Opt. Express* **21** 15090
- [10] Liu T, Shen T, Yang S M, Jiang Z D 2015 *J. Opt.* **17** 035610
- [11] Liu T, Liu Q, Yang S M, Jiang Z D, Wang T, Yang X K 2017 *Opt. Commun.* **393** 72
- [12] Yuan G H, Rogers Edward T F, Zheludev N I 2017 *Light: Sci. Appl.* **6** e17036
- [13] Qin F, Huang K, Wu J F, Teng J H, Qiu C W, Hong M H 2017 *Adv. Mater.* **29** 1602721
- [14] Wu J 2018 *M. S. Thesis* (Chongqing: Chongqing university) (in Chinese) [武靖 2018 硕士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [15] Nagarajan A, Stoevelaar L P, Silvestri F, et al. 2019 *Opt. Express* **27** 20012
- [16] Liu T, Wang T, Yang S M, Sun L, Jiang Z D 2015 *Opt. Express* **23** 32139
- [17] Yang S M, Wang T, Liu T, Jiang Z D 2016 *Opt. Commun.* **372** 166
- [18] Yu Y T, Li W L, Li H Y, Li M Y, Yuan W Z 2018 *Nanomaterials* **8** 185
- [19] Ni H B, Yuan G H, Sun L D, Chang N, Zhang D, Chen R P, Jiang L Y, Chen H Y, Gu Z Z, Zhao X W 2018 *RSC Adv.* **8** 20117
- [20] Luneburg R K 1966 *Mathematical Theory of Optics* (Berkeley: University of California Press) p305
- [21] Liu T, Yang S M, Jiang Z D 2016 *Opt. Express* **24** 16297

- [22] Chen G, Wu Z X, Yu A P, et al. 2016 *Sci. Rep.* **6** 37776
 [23] Zhang L, Cai Y J, Lu X H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1777 (in Chinese) [张蕾, 蔡阳健, 陆漩辉 2004 物理学报 **53** 1777]
 [24] Rogers E T F, Savo S, Lindberg J, Roy T, Dennis M R, Zheludev N 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 031108
 [25] Yu D Y, Tan H Y 2011 *Engineering Optics* (Beijing: China Machine Press) p118 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2011 工程光学 (北京: 机械工业出版社) 第118页]

Effect of laser illumination conditions on focusing performance of super-oscillatory lens*

Liu Kang He Tao Liu Tao[†] Li Guo-Qing Tian Bo
 Wang Jia-Yi Yang Shu-Ming[‡]

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

(Received 19 April 2020; revised manuscript received 30 May 2020)

Abstract

Super-oscillatory lens (SOL), a new type of planar optical element developed in recent years, may play an important role in the integrated optics, microscopy, advanced sensor, and astronomy. Based on the vectorial angular spectrum theory and genetic algorithm, both binary amplitude-type and phase-type SOLs are designed. Various sub-diffraction focusing properties can be realized by optimizing the design procedure. In order to investigate the focusing characteristics of SOLs under different illumination conditions, rigorous electromagnetic simulation calculations of the diffracted focusing light field are implemented by the finite-difference time-domain method. The results show that when the beam waist radius w_0 of the illuminating laser is less than the SOL radius a , not only the capability of super-diffraction limit focusing will decrease significantly, but also the intensity of the focal spot will attenuate by more than 50%. Comparing with the amplitude-type SOL, the waist radius w_0 has a strong effect on the phase-type SOL and causes a significant focus to shift in the positive direction. However, if w_0 is larger than $2a$, the ideal focusing characteristics of SOL can be maintained. Under the condition of oblique illumination, the high numerical aperture amplitude-type SOL generally only allows a small inclination angle of less than 10° , while the phase-type SOL has a wide inclination adaptability (can exceed 40°) regardless of the numerical aperture. For the latter, the focal spot will expand laterally and the intensity will decrease sharply with the increase of inclination angle. As for low numerical aperture phase-type SOL, the focusing characteristics, including focal spot size, focusing intensity and the angular position of the focus, can keep stable within an inclination angle of 18° . For imaging infinitely distant objects, the oblique illumination will produce a fluctuating field curvature and significant negative distortion for high numerical aperture SOLs, while for the low numerical aperture SOLs, the field curvature increases with inclination angle increasing and the distortion disappears almost. The research results of this paper provide an important theoretical basis for practical applications of super-oscillatory lens in the fields of sub-diffraction light focusing, super-resolution microscopic imaging, and micro-nano processing of femtosecond laser direct writing.

Keywords: focusing, diffraction, micro-nano structure, finite-difference time-domain method

PACS: 42.79.-e, 42.25.-p, 42.25.Bs, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.69.20200577

* Project supported by the Excellent Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51722509), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB1104700), and the Natural Science Foundation for Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant No. 2020SF-170).

[†] Corresponding author. E-mail: liu8483@xjtu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn