

# 可旋转变焦的双层大数值孔径超透镜\*

雷霆锋 舒观清 陈晓东†

(中山大学物理学院, 广州 510275)

(2025 年 12 月 7 日收到; 2026 年 1 月 27 日收到修改稿)

超透镜作为超表面研究的重要方向, 在紧凑型光学系统中具有广泛应用潜力. 近年来, 基于 Moiré效应的双层超透镜因能够实现变焦功能而受到关注. 然而, 现有 Moiré超透镜理论基于抛物线型透镜相位公式推导, 在大数值孔径条件下会导致球差累积, 难以实现高精度聚焦. 本研究提出一种基于理想无像差透镜相位函数的双层旋转变焦超透镜设计方法, 通过设计双层超表面的相位函数分布, 旋转其中一层超表面实现焦距调控. 设计采用三角晶格排列的陶瓷圆柱单元构成超表面, 利用时域有限差分法进行仿真验证, 同时制备口径 300 mm 的双层样品在 10 GHz 频段进行验证性实验. 结果显示, 当旋转角从  $-60^\circ$  增至  $60^\circ$  时, 焦距可从 100 mm 调节至 300 mm, 变焦比达 3:1, 最大数值孔径达到 0.83, 焦斑形态稳定, 实测焦距变化趋势与理论模型一致. 该设计实现了大数值孔径下的变焦功能, 为进一步发展紧凑型变焦器件提供了理论与实验基础.

**关键词:** 双层超透镜, 旋转变焦, 相位调控**DOI:** 10.7498/aps.75.20251674**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251674

## 1 引言

超表面 (metasurface) 是一类由亚波长尺度结构单元构成的二维人工材料, 近年来在光学与电磁波调控领域引发了广泛研究<sup>[1,2]</sup>. 通过在亚波长尺度上精确设计结构单元与几何排列, 超表面能够实现光波振幅、相位及偏振等特性的灵活调控, 在波前整形<sup>[3,4]</sup>、全息显示<sup>[5-7]</sup>、偏振调控<sup>[8,9]</sup> 等方向得到广泛应用, 展现出超越传统折射光学元件的功能密度与集成潜力. 其中, 超透镜 (metalens) 作为超表面体系的重要分支, 依托高自由度的相位调控, 实现了传统透镜的聚焦与成像功能, 为实现紧凑型、平面化光学系统提供了全新途径<sup>[10-13]</sup>.

然而, 传统超透镜大多为固定焦距与固定数值孔径 (numerical aperture, NA) 的静态光学元件, 缺乏可调性, 限制了其在变焦光学及波束控制等系统中的应用. 为突破单层结构的设计限制, 研究者

提出了双层超表面结构<sup>[14-19]</sup>, 通过引入第二层具有独立相位调控能力的界面, 实现了更高的设计自由度, 提升了系统的波前调控与光场塑形能力. 在此基础上, 基于 Moiré效应 (干涉条纹效应) 的双层旋转变焦超透镜因其结构简洁、无机械位移且能够实现焦距的连续调节而受到广泛关注<sup>[20-37]</sup>. 这类超透镜通常由两层具有特定相位分布的超表面构成, 通过绕光轴旋转其中一层, 改变两层的相位叠加分布, 从而调控系统的等效焦距. Bernet 等<sup>[20,21]</sup> 最早提出了 Moiré透镜的理论模型, 并利用衍射光学元件实验验证了其焦距可调特性. 此后, 该概念被引入超表面体系, 在微波<sup>[22]</sup>、红外<sup>[23]</sup>、可见光<sup>[25,26,29,36]</sup>、太赫兹波段<sup>[28,34,37]</sup>、超声波<sup>[35]</sup> 等波段均取得了重要进展. 例如, Iwami 等<sup>[23]</sup> 报道了一种基于旋转可调 Moiré超透镜的新型超薄平面透镜, 其在 900 nm 近红外波段实现了从负焦距到正焦距的连续调节, 兼具大口径与宽调焦范围; Luo 等<sup>[25]</sup> 进一步将该概念应用于荧光显微成像, 实现了可见光波段下高

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12522415, 12374364) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenxd67@mail.sysu.edu.cn

对比度的多平面成像. 此外, 偏振复用<sup>[30,33]</sup>、拓扑荷调控<sup>[31,32]</sup>等方向的探索, 也持续拓展了 Moiré超透镜的功能, 实现了包括双涡旋光束生成<sup>[31]</sup>及增强现实显示<sup>[36]</sup>等多种新型光学应用.

尽管现有研究已验证了 Moiré超透镜在焦距可调和波前重构方面的可行性, 但其性能仍受若干关键因素制约. 传统设计通常基于抛物线型相位公式模型, 该相位公式源自理想透镜相位函数的傍轴近似展开式, 在小角度、低数值孔径的傍轴条件下具有较好的近似精度. 对于大  $NA$  系统而言, 在大数值孔径条件下, 忽略高阶相位项将导致非傍轴区域的相位偏离理想无像差透镜相位, 从而引发显著的像差<sup>[38]</sup>. 这种理论近似的局限不仅降低了聚焦效率与成像质量, 也限制了旋转变焦透镜在大  $NA$  条件下的应用. 因此, 有必要在现有旋转变焦 Moiré超透镜理论框架的基础上, 进一步拓展出一种适用于大数值孔径条件的相位模型, 这对于推动高性能变焦光学系统的发展具有重要意义.

针对上述问题, 本文提出了一种基于理想无像差透镜相位函数的双层旋转变焦超透镜设计方法, 并在 10 GHz 工作频率下设计了验证样品. 与传统依赖抛物线近似的设计思路不同, 该方法直接从理想透镜完整相位函数出发, 在不引入傍轴近似假设的前提下推导出双层结构的相位表达式, 从理论上减小了由傍轴近似引入的高阶相位误差. 数值仿真与实验结果均表明, 该变焦双层超透镜实现了约 3:1 的变焦范围, 焦距变化趋势与理论预测一致, 最大  $NA$  为 0.83. 本研究从理想无像差透镜相位函数出发, 对传统旋转变焦 Moiré超透镜中基于抛物线近似的相位设计模型进行了修正, 从而实现了大  $NA$  条件下的双层旋转变焦超透镜, 为紧凑化平面变焦光学系统提供了新的理论与设计参考.

## 2 理论模型与设计方法

双层旋转变焦超透镜由两层具有特定相位分布的超表面  $MS_1$  与  $MS_2$  组成, 如图 1(a) 所示. 通过绕光轴旋转第二层超表面  $MS_2$ , 即可调节系统的等效焦距, 实现变焦功能. 在设计双层超表面的相位函数时, 首先设定一个固定设计旋转角  $\alpha_0$ , 并规定当第二层旋转该角度时, 系统焦距由  $f_1$  变化为  $f_2$ . 其中  $\alpha_0$  是设计阶段的常量, 用于确定两层超表面的相位分布关系. 设两层超表面  $MS_1$  与  $MS_2$

的相位函数分别为  $\varphi_1(r, \theta)$  与  $\varphi_2(r, \theta)$ . 当第二层旋转角度  $\alpha_0$  前后, 系统的合相位分别为

$$\varphi_{\text{total}}(r, \theta) = \varphi_{f_1}(r), \quad (1)$$

$$\varphi_{\text{total}}(r, \theta + \alpha_0) = \varphi_{f_2}(r), \quad (2)$$

其中  $\varphi_{f_1}(r)$  与  $\varphi_{f_2}(r)$  分别描述系统在旋转前后对应焦距为  $f_1$  与  $f_2$  的透镜相位分布. 两式相减可得

$$\varphi_2(r, \theta + \alpha_0) - \varphi_2(r, \theta) = \varphi_{f_2}(r) - \varphi_{f_1}(r). \quad (3)$$

为便于分离角度变量, 设  $\varphi_2(r, \theta) = g(r) \cdot \theta + f(r)$ , 其中  $g(r) \cdot \theta$  为角度相关项,  $f(r)$  为任意圆对称函数. 代入上式可得

$$g(r) \cdot \alpha_0 = \varphi_{f_2}(r) - \varphi_{f_1}(r). \quad (4)$$

由于圆对称函数不会影响透镜聚焦结果, 可令  $f(r) = 0$ , 于是第二层超表面的相位函数可写为

$$\varphi_2(r, \theta) = \frac{\theta}{\alpha_0} [\varphi_{f_2}(r) - \varphi_{f_1}(r)]. \quad (5)$$

需要注意的是, 在极坐标表示下, 该相位函数在  $\theta = \pi$  处会出现非  $2\pi$  整数倍的相位跳变, 破坏了光学相位的  $2\pi$  周期性. 为了消除这一不连续性, 本文对角度相关项  $g(r)$  进行了取整修正 (round 函数), 使相位函数沿角向连续变化<sup>[20]</sup>. 最终得到两层超表面的相位函数表达式:

$$\varphi_1(r, \theta) = \varphi_{f_1}(r) - \varphi_2(r, \theta), \quad (6)$$

$$\varphi_2(r, \theta) = \text{round} \left[ \frac{\varphi_{f_2}(r) - \varphi_{f_1}(r)}{\alpha_0} \right] \cdot \theta. \quad (7)$$

接下来, 我们需要确定  $\varphi_{f_1}(r)$  与  $\varphi_{f_2}(r)$  的相位函数表达式. 理想聚焦透镜的相位函数为

$$\varphi_{\text{ideal}}(r) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} \left( \sqrt{r^2 + f^2} - f \right). \quad (8)$$

利用傍轴条件 ( $r \ll f$ ) 近似展开:

$$\sqrt{r^2 + f^2} \approx f + \frac{r^2}{2f} - \frac{r^4}{8f^3} + \dots,$$

忽略高阶项后, 可得到抛物线近似的透镜相位分布:

$$\varphi_{\text{parabolic}}(r) = -\frac{\pi r^2}{\lambda_0 f}. \quad (9)$$

抛物线近似的透镜相位函数适用于小  $NA$  系统, 但  $r$  接近  $f$  时, 即在大  $NA$  条件下, 高阶相位项对波前传播的影响不可忽略, 离轴光线无法与轴上光线共焦, 从而引发像差, 导致聚焦性能明显退化. 为了在大  $NA$  条件下获得更好的聚焦效果, 我们以

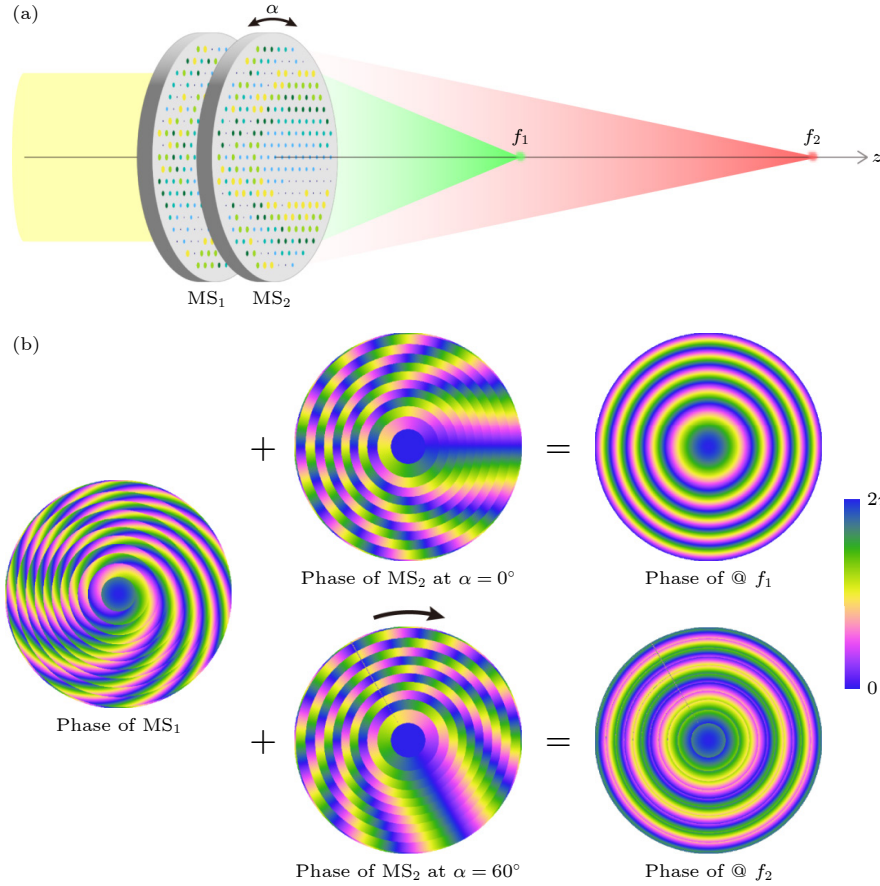


图 1 基于旋转调控相位的双层超透镜变焦原理示意图 (a) 双层旋转变焦超透镜结构示意图, 通过旋转第二层超表面  $MS_2$  可以实现焦距变化; (b) 双层超表面的相位及其叠加相位的分布示意图. 随着旋转角  $\alpha$  增大, 等相位圈数减少, 对应透镜焦距增大  
 Fig. 1. Schematic of the zooming principle of a bilayer metalens based on rotation-controlled phase: (a) Schematic of the bilayer rotational zoom metalens. The focal length can be tuned by rotating the second metasurface; (b) illustration of the phase distributions of the two metasurfaces and their combined phase. As the rotation angle increases, the number of equiphase rings decreases, corresponding to an increase in the lens focal length.

(8) 式的理想无像差透镜的相位函数作为  $\varphi_{f_1}(r)$  与  $\varphi_{f_2}(r)$  的透镜相位表达式, 从理论上避免了傍轴近似引入的相位误差, 从而提高了双层变焦超透镜模型在大  $NA$  条件下的适用性. 最终双层超表面的相位分布如图 1(b) 所示, 当旋转角  $\alpha$  从 0 增大到  $60^\circ$  时, 合成相位的等相位圈数减少, 对应焦距增大, 验证了系统的变焦功能.

### 3 超表面单元结构与仿真

为实现双层旋转变焦超透镜所需的目标相位分布, 需要构建在工作频段内兼具高透过率与完整相位调控范围的超表面单元结构. 本研究选用折射率  $n \approx 3$  的氧化铝陶瓷作为介质材料, 并采用圆柱形介质柱作为超表面的基本结构单元, 如图 2(a) 所示. 圆柱形介质单元具有旋转对称性, 其电磁响

应与入射电磁波的偏振方向无关, 因此本研究设计的超透镜是偏振无关的. 为兼顾相位调控范围与透射效率的平衡, 对三角晶格排列的圆柱阵列在工作频率 10 GHz 下进行了参数扫描, 考察晶格常数  $a$ 、圆柱高度  $h$  与直径  $D$  的影响. 图 2(b) 和图 2(c) 展示了在固定圆柱高度  $h$  条件下, 不同晶格常数  $a$  与圆柱直径  $D$  对透过率与相位响应的影响; 图 2(e) 和图 2(f) 则展示了在固定晶格常数  $a$  时, 圆柱高度  $h$  与圆柱直径  $D$  的扫描结果. 结果表明, 圆柱直径  $D$  是决定相位调制能力的主要参数, 随着直径增加, 相位响应单调上升并可实现  $0-2\pi$  的连续覆盖; 而过高的结构会引入 Fabry-Perot 型谐振, 导致透过率下降. 综合透射效率与相位覆盖范围, 最终选取在  $a = 18 \text{ mm}$ ,  $h = 24 \text{ mm}$  条件下, 透过率高于 85% 且相位响应连续覆盖  $2\pi$  的单元结构组合作为设计方案. 其透射率和相位响应与圆柱直径之间的

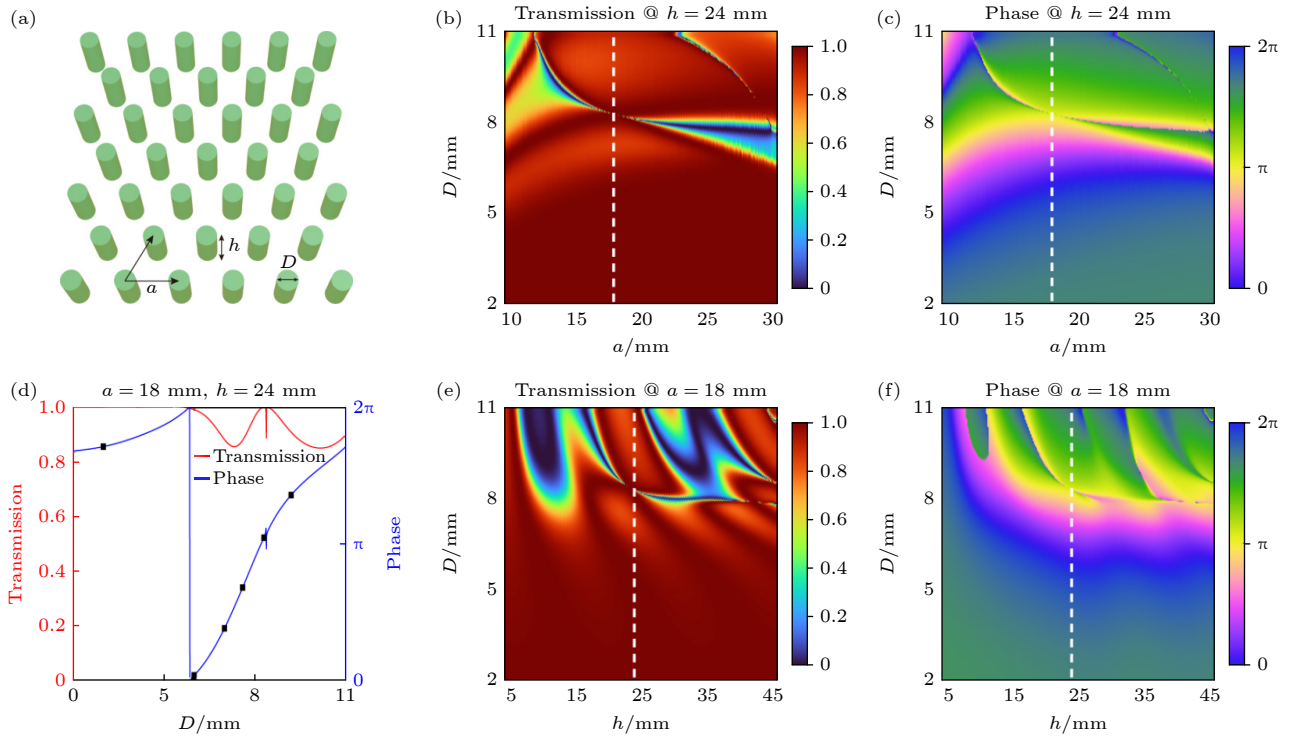


图 2 超透镜单元结构与参数优化 (a) 超表面周期结构及几何参数示意图; (b), (c) 高度  $h = 24$  mm 时, 不同晶格常数与圆柱直径下的透过率和相位响应; (d) 在选定参数下的透射率与相位分布, 黑点表示最终选取的单元参数; (e), (f) 周期常数  $a = 18$  mm 时, 不同圆柱高度与直径下的透过率和相位响应

Fig. 2. Unit design and parameter optimization of the metasurface: (a) Schematic of the unit cell of metasurface and its geometric parameters; (b), (c) transmission and phase responses under different lattice constants and cylinder diameters at a height of  $h = 24$  mm; (d) transmission and phase distributions for the selected parameters, with black dots indicating the final chosen unit cell parameters; (e), (f) transmission and phase responses for different cylinder heights and diameters at a lattice constant  $a = 18$  mm.

关系如图 2(d) 所示, 该关系构建了后续透镜设计所需的相位库. 基于此相位库, 可将双层超表面的设计相位分布精确映射至具体的几何参数, 实现双层旋转变焦超透镜的整体结构设计.

为验证理论模型与设计方法的有效性, 我们利用时域有限差分法对所设计的双层旋转变焦超透镜进行了全波仿真. 图 3(a) 展示了不同旋转角条件下的焦深面 ( $XZ$  面) 电场强度分布, 可直观地观察到焦点位置随旋转角的变化. 为了将仿真结果与理论预期进行对比, 将理想透镜相位函数 ((8) 式) 与合相位进行匹配, 得到了如图 3(a) 中黑色虚线所示的焦距随旋转角变化的理论曲线. 仿真结果与理论预测一致, 验证了设计的变焦特性. 图 3(b) 为焦平面 ( $XY$  面) 电场强度分布, 结果显示焦点能量集中、主峰清晰且分布对称, 表明在不同旋转角下超透镜均保持良好的聚焦性能. 仿真结果表明, 随着旋转角  $\alpha$  从  $-60^\circ$  增大至  $60^\circ$ , 透镜焦距从 99 mm 变化至 298 mm, 变焦范围约为 3 倍, 同时数值孔径由 0.83 降至 0.45. 该结果与理论模型预期一致,

充分验证了本文所提出的大  $NA$  双层旋转变焦超透镜设计方法的可行性与准确性.

## 4 实验结果

为进一步验证双层旋转变焦超透镜的实际性能, 依据前述相位库设计结果, 本文采用氧化铝陶瓷柱制备了双层旋转变焦超透镜样品. 图 4(a) 展示了用于构建超透镜的 6 种不同直径 (3—9.2 mm) 介质柱单元, 圆柱高度  $h = 24$  mm, 其单元尺寸参数与图 2(d) 中所示的相位库一一对应. 图 4(b) 和图 4(c) 为双层超透镜实物图, 透镜口径为 300 mm, 陶瓷柱嵌入折射率  $n \approx 1.05$  的泡沫基板中, 按照三角晶格方式排布, 晶格常数为 18 mm, 工作频率为 10 GHz, 对应波长 30 mm. 为便于识别不同介质柱单元, 样品实物图中采用图 4(a) 展示的不同颜色标识对应不同的圆柱直径. 实验系统示意图如图 4(d) 所示. 实验中, 低副瓣喇叭天线作为激励源, 用于产生近似平面波照射至超透镜表面. 两层

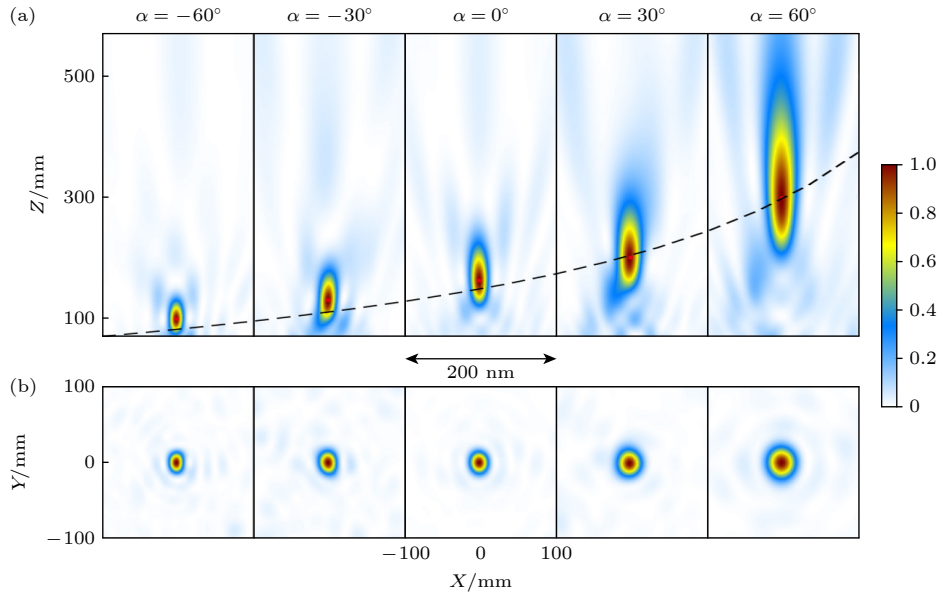


图3 双层旋转变焦超透镜的全波仿真结果 (a) 不同旋转角下的  $XZ$  平面场强分布, 虚线为理论计算的焦距变化曲线; (b) 焦平面 ( $XY$  面) 的场强分布图, 展示了聚焦点能量的空间分布及变化趋势, 表明该系统具有稳定的聚焦特性

Fig. 3. Full-wave simulation results of the bilayer rotational zoom metalens: (a)  $XZ$ -plane field intensity distributions at different rotation angles. The dashed line represents the theoretically calculated focal length variation; (b) field intensity distribution on the focal plane ( $XY$  plane), showing the spatial distribution and variation trend of the focal spot energy. The system exhibits stable focusing characteristics.

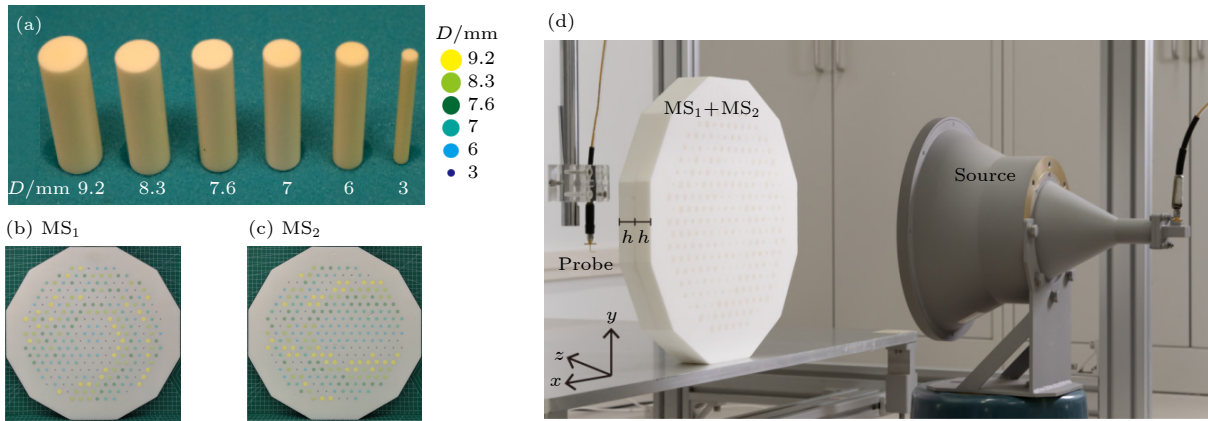


图4 双层旋转变焦超透镜的实验系统与样品示意图 (a) 六种不同直径的陶瓷柱单元, 与相位库对应; (b), (c) 双层超透镜实物图 (口径 300 mm); (d) 近场电磁扫描实验系统照片, 双层超透镜紧贴在一起

Fig. 4. Experimental setup and sample of the bilayer rotational zoom metalens: (a) Six types of ceramic cylinder units corresponding to the phase library; (b), (c) photographs of the bilayer metalens (aperture 300 mm); (d) photo of the near-field electromagnetic scanning experimental system, with the bilayer metalens closely attached.

超透镜对准后紧密贴合并固定于支架上, 其中心平面定义为  $z = 0$ . 电场探针安装在三维精密机械臂末端, 可在  $x, y, z$  三个方向高精度移动, 实现空间电场的逐点扫描, 从而获取三维电场分布信息.

图 5(a) 展示了不同旋转角条件下焦深面 ( $XZ$  面) 的实验测量结果. 随着第二层超表面  $MS_2$  旋转角度  $\alpha$  的增加, 焦点逐渐远离透镜表面, 清晰地体现出焦距的可调特性. 图 5(b) 为焦平面

( $XY$  面) 的实验结果, 焦点区域能量集中、主峰清晰, 表明样品在实际测量中保持了稳定的聚焦能力. 为进一步分析焦距变化规律及聚焦性能, 将实验结果与仿真结果进行对比. 如图 5(c) 所示, 实验测得的焦距随旋转角的变化趋势与理论预测曲线一致, 虽然在具体焦距数值上存在一定偏差, 但该差异主要源于样品几何尺寸及折射率的偏差, 以及实验入射电磁波与理想平面波条件之间的差异等

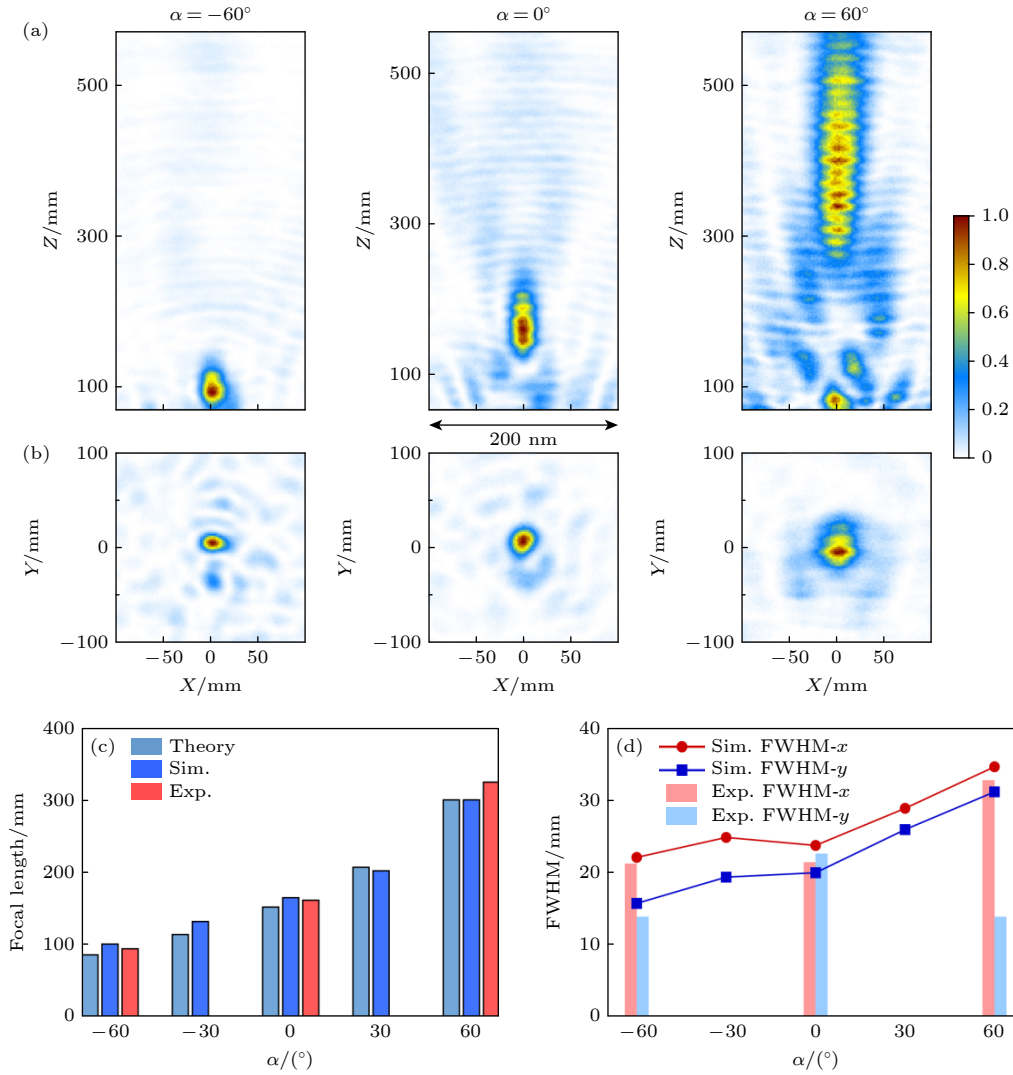


图 5 双层旋转变焦超透镜的实验结果与性能对比 (a) 不同旋转角下焦深面 ( $XZ$  平面) 场强分布; (b) 焦平面 ( $XY$  面) 实验测量结果; (c) 理论、仿真与实验的焦距变化趋势对比; (d) 仿真与实验的焦斑半高宽 (FWHM) 对比

Fig. 5. Experimental results and performance comparison of the bilayer rotational zoom metalens: (a) Focal depth plane ( $XZ$ -plane) field intensity distributions at different rotation angles; (b) experimental results on the focal plane ( $XY$ -plane); (c) comparison of focal length variation trends among theory, simulation, and experiment; (d) comparison of simulated and measured focal spot full-width at half-maximum (FWHM).

非理想因素. 在  $-60^\circ$  至  $60^\circ$  的范围内, 焦距约从 92.5 mm 增加至 322.5 mm, 实现约 3 倍的变焦范围. 此外, 如图 5(d) 所示, 焦斑半高宽随旋转角变化趋势与仿真结果吻合良好, 进一步表明该模型在大  $NA$  条件下具有良好的适用性.

## 5 结论

本文针对传统双层 Moiré 旋转变焦超透镜在大数值孔径条件下的应用需求, 提出了一种可旋转变焦的双层大数值孔径超透镜设计方法. 不同于传统模型依赖抛物线型透镜相位近似的设计思路, 本

文方法从理想无像差透镜相位函数出发, 从理论上有效地减小了大数值孔径条件下非傍轴区域的相位偏离, 有助于抑制由高阶相位误差引起的像差, 使旋转变焦系统在较宽角度范围内仍能够保持稳定的聚焦性能. 在此基础上, 本文完成了双层旋转变焦超透镜的结构设计与数值仿真, 并通过时域有限差分法仿真和近场扫描实验, 对所提出设计方法的可行性进行了系统验证. 结果表明, 在 10 GHz 的工作频率下, 当第二层超表面旋转角从  $-60^\circ$  增加至  $60^\circ$  时, 焦距在 100—300 mm 范围内变化, 变焦比约为 3:1, 焦距变化趋势与理论分析及数值仿真结果一致. 需要注意的是, 由于超表面单元的相位

响应具有较强色散, 该双层超透镜在偏移工作频率(如 9 GHz 或者 11 GHz) 下焦斑劣化非常严重, 因此后续需要采用消色差设计方案优化频率带宽. 在整个变焦过程中, 焦点形态保持稳定、能量分布集中, 验证了所提出的相位模型与设计方法的有效性. 综上, 本文构建了一套从理想相位理论推导、双层超表面单元结构设计到实验验证的完整研究框架, 实现了无机械位移的大数值孔径旋转变焦功能, 最大数值孔径达到 0.83. 该研究为旋转变焦 Moiré 超透镜在大  $NA$  条件下的设计提供了新的理论参考, 也为轻量化、平面化可调焦光学系统的发展提供了有益思路.

## 参考文献

- [1] Yu N, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [2] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 937
- [3] Dorrah A H, Park J S, Palmieri A, Capasso F 2025 *Nat. Commun.* **16** 3126
- [4] Dagli S, Shim J, Carr Delgado H, Balch H B, Abdollahramezani S, Chen C, Dolia V, Klopfer E, Dixon J, Hu J, Ogunlade B, Song J, Brongersma M L, Barton D, Dionne J A 2025 *Adv. Mater.* **37** e06790
- [5] Wan W, Gao J, Yang X 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1700541
- [6] Gao H, Wang Y, Fan X, Jiao B, Li T, Shang C, Zeng C, Deng L, Xiong W, Xia J, Hong M 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba8595
- [7] Ji J, Ye Z, Wang Z, Sun J, Li X, Li J, Wang J, Fang B, Gao Z, Hu S, Zhu S, Li T 2025 *Light Sci. Appl.* **14** 332
- [8] Zhou Y, Zhang T, Wang G, Guo Z, Zang X, Zhu Y, Ding F, Zhuang S 2024 *Adv. Sci.* **11** 2406571
- [9] Li S, Chen C, Wang G, Ge S, Zhao J, Ming X, Zhao W, Li T, Zhang W 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 023803
- [10] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 7069
- [11] Lin D, Fan P, Hasman E, Brongersma M L 2014 *Science* **345** 298
- [12] Khorasaninejad M, Capasso F 2017 *Science* **358** eaam8100
- [13] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, Khorasaninejad M, Shi Z, Lee E, Capasso F 2018 *Nat. Nanotechnol.* **13** 220
- [14] Liu R, Wang L 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 145105
- [15] Cai X D, Tang R, Zhou H Y, Li Q S, Ma S J, Wang D Y, Liu T, Ling X H, Tan W, He Q, Xiao S Y, Zhou L 2021 *Adv. Photon.* **3** 036003
- [16] Liu R, He J, Zhang J, Wang L 2022 *J. Appl. Mech.* **89** 121001
- [17] Wu Z, Liu R, Wei N, Wang L 2024 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26** 3823
- [18] Zhu G, Liu R, Tang C, Wang L 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 173508
- [19] Zhu G, Liu R, Wang L 2025 *Int. J. Solids Struct.* **309** 113190
- [20] Bernet S, Ritsch-Marte M 2008 *Appl. Opt.* **47** 3722
- [21] Bernet S, Harm W, Ritsch-Marte M 2013 *Opt. Express* **21** 6955
- [22] Guo Y, Pu M, Ma X, Li X, Shi R, Luo X 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 163103
- [23] Iwami K, Ogawa C, Nagase T, Ikezawa S 2020 *Opt. Express* **28** 35602
- [24] Zhou T, Hu B, Liu Z, Liu J 2021 *Optik* **247** 167806
- [25] Luo Y, Chu C H, Vyas S, Kuo H Y, Chia Y H, Chen M K, Shi X, Tanaka T, Misawa H, Huang Y Y, Tsai D P 2021 *Nano Lett.* **21** 5133
- [26] Ogawa C, Nakamura S, Aso T, Ikezawa S, Iwami K 2022 *Nanophotonics* **11** 1941
- [27] Zhu S, Jiang Q, Wang Y, Huang L 2023 *Nanophotonics* **12** 1169
- [28] Zhang J C, Wu G B, Chen M K, Liu X, Chan K F, Tsai D P, Chan C H 2023 *Sci. Adv.* **9** eadfs478
- [29] Chia Y, Liao W, Vyas S, Chu C H, Yamaguchi T, Liu X, Tanaka T, Huang Y, Chen M K, Chen W, Tsai D P, Luo Y 2024 *Adv. Sci.* **11** 2307837
- [30] Liu Y, Chi C, Shan Y, Cheng D, Wang Y 2024 *Opt. Express* **32** 40666
- [31] Shang S, Liu H, Meng H, Wang F, Yang X, Shou Q, Wei Z 2024 *Opt. Express* **32** 28370
- [32] Nan T, Zhu Z, Wang G, Wang Y, Sun S, Tian H, Zhang Y 2025 *Nanophotonics* **14** 2695
- [33] Xu W, Li H, Zhao C, Li J, Tan Q, Liu Y, Xu H, Shen Y, Yao J 2025 *Photonics Res.* **13** 2130
- [34] Pander A, Kagami H, Kitayama D, Hamada H, Takahashi H 2025 *Optica* **12** 1327
- [35] Yuan G Q, Li X R, Zhu X F, Yao J, Wei Q, Wu D J 2025 *Ultrasonics* **145** 107466
- [36] Song Y, Yuan J, Chen Q, Liu X, Zhou Y, Cheng J, Xiao S, Chen M K, Geng Z 2025 *Photonix* **6** 6
- [37] Sun C, Zeng Z, Wang W, Du L, Chen X, Leng J, Li J, Liu Q, Wen Z, Qi P, Liu W, Zhu L G 2025 *Laser Photonics Rev.* **19** 2401935
- [38] Restrepo J, Stoerck P J, Ihrke I 2016 *J. Opt. Soc. Am. A* **33** 160

# Dual-layer large-numerical-aperture metalenses with rotational zoom capability\*

LEI Tingfeng SHU Guanqing CHEN Xiaodong<sup>†</sup>*(School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)*

( Received 7 December 2025; revised manuscript received 27 January 2026 )

## Abstract

Metalenses have emerged as a versatile platform for wavefront engineering, enabling compact and planar optical systems with unprecedented functional density. However, most reported metalenses rely on single-layer architectures that inherently support only a fixed focal length, which limits their application in tunable imaging and adaptive photonic systems. Dual-layer Moiré-type metalenses offer an alternative pathway to achieving zoom functionality by modulating the effective phase profile through relative rotation rather than axial translation. Despite this advantage, existing designs predominantly employ a paraxial parabolic phase approximation based on the truncated expansion of the ideal lens phase. Such approximations become inaccurate under large-numerical-aperture ( $NA$ ) conditions, where neglected higher-order phase components introduce accumulated spherical aberration and degraded focusing performance. Here, we present a non-paraxial design strategy based on the full ideal aberration-free phase function for a dual-layer rotational zoom metalens. By adopting the exact lens phase expression rather than the conventional parabolic approximation, this approach preserves the higher-order phase contributions critical to large- $NA$  operation. Zooming is achieved by engineering complementary phase distributions on two metasurface layers and dynamically modulating their combined phase via controlled rotation. To realize the target phase profiles, a dielectric metasurface operating at 10 GHz is designed using ceramic cylindrical resonators arranged in a triangular lattice. A systematic parametric optimization of lattice period, cylinder diameter, and height ensures a complete  $2\pi$  phase coverage while maintaining a transmission above 85%. The resulting phase-geometry mapping establishes a reliable unit-cell library for device implementation. Leveraging this library, the dual-layer metalens is designed and its performance evaluated through finite-difference time-domain (FDTD) simulations. A prototype with a 300 mm aperture is fabricated and experimentally characterized using three-dimensional near-field scanning measurements. Both simulations and experiments confirm that continuous focal-length tuning is achieved as the rotation angle varies from  $-60^\circ$  to  $60^\circ$ , corresponding to a focal-length range of 100 to 300 mm and a zoom ratio of 3:1. The device achieves a maximum  $NA$  of 0.83, and the measured focal spots remain nearly diffraction-limited. The experimentally extracted focal-length variation agrees closely with theoretical predictions and simulations. These results validate the non-paraxial design model and demonstrate the viability of large- $NA$  zoom operation in a dual-layer metasurface. This work offers a promising route for lightweight variable-focus optics and holds significant potential for next-generation tunable imaging systems and compact optical platforms.

**Keywords:** dual-layer metalenses, rotational zoom, phase modulation**DOI:** [10.7498/aps.75.20251674](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251674)**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251674](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251674)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12522415, 12374364).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [chenxd67@mail.sysu.edu.cn](mailto:chenxd67@mail.sysu.edu.cn)

## 可旋转变焦的双层大数值孔径超透镜

雷霆锋 舒观清 陈晓东

### Dual-layer large-numerical-aperture metalenses with rotational zoom capability

LEI Tingfeng SHU Guanqing CHEN Xiaodong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100401 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251674

CSTR: 32037.14.aps.75.20251674

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251674>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

太赫兹斯格明子径向阶数的可编程调控

Programmable regulation of radial order of terahertz skyrmions

物理学报. 2026, 75(5): 100401 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251463>

弧度与旋转共同诱导相位调控太赫兹超表面

Radian and rotation co-induced phase controlling terahertz metasurfaces

物理学报. 2025, 74(2): 028701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241465>

基于相位调制的高相干光源照明匀化方法

Illumination homogenization of highly coherent light source based on phase modulation

物理学报. 2024, 73(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240644>

基于矢量焦点超构透镜的偏振结构及高安全性光学加密

Polarization structures generated through metalenses with vectorial foci for high-security optical encryption

物理学报. 2025, 74(17): 174201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250508>

可重构超构表面实现L波段波束动态调控及信息调制

Reconfigurable metasurface achieved dynamic beam control and information modulation of L-band beams

物理学报. 2025, 74(10): 108101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241668>

复合相位调控的波束转向可控反射型超表面

Composite phase modulated beam steering controllable reflective metasurface

物理学报. 2024, 73(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240764>