# 氧化石墨烯可调超透镜的仿真与优化

#### 杨程缘,孙明宇\*

上海理工大学智能科技学院,上海

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

# 摘要

多焦点镜头是光通信、虚拟现实显示和显微镜的重要组成部分,但传统镜头的体积庞大严重阻碍了其广 泛应用。得益于超表面前所未有的光调制能力,超透镜能够以更紧凑的占地面积提供多焦点功能。目前 双焦点或多焦点超透镜已经实现,但它们大部分都是将多个单焦点超透镜基于复用的形式组合成一个多 焦点超透镜,导致不可避免的串扰和较低的聚焦效率,而且不便于控制不同焦点之间的相对强度。因此, 文章提出了一种拟利用激光直写氧化石墨烯材料实现可调多焦点超透镜。这种设计使超透镜能够产生多 个焦点,同时保持与单焦点超透镜相当的捕获目标信息的能力。该方法在光学成像、光束整形、自适应 光学等领域具有重要的应用潜力。

## 关键词

超透镜,时域有限差分法,几何相位

# Simulation and Optimization of Graphene Oxide Tunable Metalens

#### Chengyuan Yang, Mingyu Sun\*

School of Artificial Intelligence Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

#### Abstract

Multi-focus lenses are an important part of optical communication, virtual reality display, and microscope, but the large size of traditional lenses seriously hinders its wide application. Thanks to the unprecedented light modulation capability of metasurfaces, metalens can provide multi-focus functionality in a more compact footprint. Currently, bifocal or multi-focus metalenses have been

\*通讯作者。

realized, but most of them combine multiple single-focus metalenses into multi-focus metalens based on multiplexing, resulting in inevitable crosstalk and low focusing efficiency, and it is not easy to control the relative intensity between different focal points. Therefore, in this paper, a tunable multi-focus metalens is proposed by using laser direct writing graphene oxide material. This design enables the metalens to generate multiple focal points while maintaining the ability to capture target information comparable to that of a single-focal metalens. This method has important potential for application in optical imaging, beam shaping, adaptive optics, and other fields.

## **Keywords**

Metalens, Finite-Difference Time-Domain Method, Pancharatnam-Berry Phase

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

# 1. 引言

光学系统中的透镜是基础且至关重要的元件。传统透镜一般使用玻璃等材料制成,依赖形状和折射 率实现对光线的聚焦、折射和成像功能。传统透镜虽然拥有成熟的制造工艺和广泛的应用,但是也存在 着一些固有的缺点,如色差、对称性限制和较大的体积重量,这些局限性在一些特定应用场景中显得更 为明显。近年来,随着纳米技术和超材料(Metamaterial)[1][2]等新兴技术的发展,基于二维超材料的元光 学提供了具有多功能的光学元件的超薄化、小型化。超表面(Metasurface)是超材料的二维等价物[3][4], 光学超表面利用亚波长结构与光的相互作用来调节振幅、相位和偏振等特性,具有超轻、超薄、易于集 成的优点,易于制备平面化集成化的光学设备与器件,如光束偏转器[5]、全息图[6]、超透镜(Metalens)[7]-[9]。基于超表面的超透镜是一种由致密平面内的非均匀光学天线阵列组成的透镜,它改善了传统透镜笨 重且巨大的光学系统。由于其对传输和反射电磁波的相位具有前所未有的控制能力,已成为发展小型化 光学透镜的通用手段。基于不连续相位原理,超表面可以对光实现局部操纵,以理想的方式传递突变相 移,打破了对沿光路连续相位累积的依赖。

通常,超透镜设计与制备中涉及的原理有共振相位、传输相位和几何相位。我们发现研究者已经利 用这些原理实现了各式各样的单焦点[10]、双焦点[11]或多焦点[12]超透镜。多焦点超透镜将一束入射光 纵向或横向聚焦到不同的位置,因此在光通信、多成像系统、光学层析成像技术、光学数据存储等方面 有着重要的应用。同时多焦点的功能对器件设计也提出了更高要求。而且,这些透镜多数仍然以静态设 计为主,焦点相对强度通常是固定不变的,要实现超表面的动态调制,通常需要对同一材料的性质进行 调控,往往需要引入复杂的可调结构或外调控设计,增加了器件设计的复杂性。动态光学超透镜可以对 透射、反射、折射等的光束进行动态控制,包括单独或同时控制光的相位、振幅、偏振以及光谱的时间、 空间响应。通过对可调材料的适当选择和对超原子的合理设计,超表面能够实现对光的相位和振幅等物 理参量的动态调控[13]。合理设计具有入射光方向、偏振依赖的超表面,并结合可调材料或者手段实现入 射光方向和偏振的动态可调,即可实现超表面的动态响应调控。光调谐超表面基于光热效应与材料相变, 高能激光的光热效应诱导材料局部升温,产生相变,其折射率的变化调制超表面功能。Wang 等人基于 GST 材料制备的可擦写超材料器件,利用飞秒激光直写使得局域发生像素化可重构相变,通过对 GST 的 图形化设计,制备了可见波段双色多焦点的菲涅尔波带片、具有亚波长焦距的超振荡透镜、灰度全息、 介电超材料器件,实现了多种功能[14]。随后,德国 Taubner 教授团队利用 GST 相变材料实现了对表面 声子 - 激子的动态调控[15]。

石墨烯(Graphene)一种二维蜂窝状结构的碳原子层结构,有着独特光学和电学特性的二维半导体材料, 近年来通过激光直写(Laser Direct Writing, LDW)氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)的手段可获得不同还原 程度的石墨烯,成为设计可调超表面的理想材料。贾宝华课题组中 Wang 等人利用了氧化石墨烯超透镜 来精确控制相位和振幅调制,并实现了基于石墨烯基材料系统的整体和系统的透镜设计。他们通过两种 氧化石墨烯超透镜的演示,实验验证了两种超透镜:一种是超长(~16 λ)光学针,另一种是轴向多焦点,波 长为 632.8 nm,厚度为 200 nm 薄膜。他们提出的氧化石墨烯超透镜为精确设计石墨烯基超薄可集成器件 提供了前所未有的机会[16]。浙江科技大学精密测量实验室 Chen 等人设计的厚度为~200 nm 的超薄氧化 石墨烯透镜,能有效控制多个入射波长(450 nm、550 nm 和 650 nm)的色散,在焦点上实现强度一致的超 分辨率[17]。因此,本研究基于传输相位和几何相位结合,在可见光下利用可调谐材料 GO 来实现超透镜 的动态调控,提出了一种潜在可调超透镜设计能够实现多焦点以及焦点强度可调的功能。

#### 2. 超透镜原理

通常,在超透镜的器件设计与制备过程中,其相位调控机制主要基于三种核心物理原理:共振相位 (Resonance Phase)、传输相位(Propagation Phase)和几何相位(Pancharatnam-Berry Phase, PB Phase)。这三种 相位调控方式各具特色且相互补充,共同构成了现代超表面设计的理论基础。本文利用了传输相位和几 何相位相结合的原理设计可调谐超透镜。

### 2.1. 传输相位

传输相位是通过电磁波在传输过程中产生的光程差来实现相位调控。假定介质的折射率为*n*,波长 为λ 的电磁波在该均匀介质中传输一定距离*d*,则电磁波积累的传输相位可表示为:

$$\rho = nk_0 d \tag{1}$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波矢。根据式(1),除了通过d来实现传输相位的调节,另外一个有效的方法就 是对折射率n进行调节。通过空间变化等效折射率 $n_{eff}$ ,可在厚度d保持不变的情况下实现平面的相位型 光学元件设计;此外,如果等效折射率 $n_{eff}$ 达到足够大,器件的厚度可有效减小。在实验过程中为了制备 方便,通常控制其高度不变,因此,在设计的过程中也保持高度 H 不变,通过改变材料的折射率来调控 超透镜。

## 2.2. 几何相位

几何相位是通过调整相同尺寸的微纳结构,并将其主轴旋转到一定的角度[18][19]来调整相位,如图 1(b)所示。当在 XY 平面上具有各向异性结构的几何形状相对于 Z 轴旋转一个θ角时,透射光的交叉偏振 分量将产生一个额外的相位因子 exp(*i*2θ)。几何相位可以通过琼斯矩阵 J 来描述,当一束电磁波入射到 超表面,其过程描述为:

$$\begin{bmatrix} E_x^{out} \\ E_y^{out} \end{bmatrix} = J_{\theta} \begin{bmatrix} E_x^{in} \\ E_y^{in} \end{bmatrix}$$
(2)

其中 $E_x^{in}$ 、 $E_y^{in}$ 为入射偏振光沿x、y方向的投影偏振分量, $E_x^{out}$ 、 $E_y^{out}$ 为经微纳结构调制的输出偏振光沿x、y方向的投影偏振分量, $J_{\theta}$ 为微纳结构对应的琼斯矩阵,它可以表示为:

$$J_{\theta} = R(\theta) \begin{bmatrix} T_{u} e^{i\phi_{u}} & 0\\ 0 & T_{v} e^{i\phi_{v}} \end{bmatrix} R(-\theta)$$
(3)

DOI: 10.12677/mos.2025.145444

其中 $T_u$ 、 $T_v$ 分别为沿结构长轴和短轴的振幅,  $\varphi_u$ 、 $\varphi_v$ 分别为沿结构长轴和短轴的相位延迟,  $R(\theta)$ 与 $R(-\theta)$ 为旋转矩阵,表达式为:

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$
(4)

公式(4)表示微纳结构沿x轴正方向逆时针转动 $\theta$ 角,因此对于圆偏振光照射后相位变化为:

$$\varphi_{PB} = \pm 2\theta \left( x, y \right) \tag{5}$$

## 2.3. 传输相位与几何相位结合

为实现对光场相位的全面调控[20],本文结合了几何相位与传输相位两种机制。几何相位通过调控光的偏振态,实现偏振相关的相位调控,而传输相位则依赖于材料的折射率与结构参数。二者的叠加相位可表示为:

$$\phi = \varphi(x, y) + \varphi_{PB}(x, y) \tag{6}$$

#### 2.4. 聚焦原理

基于广义斯涅尔定律,设计超透镜的光束偏折特性以及确定透镜各位置点的相位。利用 PB 相位的原 理,以θ的角度旋转超表面单元的主轴。当θ从0变为π时,相位差为2θ,单元的相位从0变为2π。同 时,将入射平面波前改造成球形波前,平面透镜的原理示意图如图 1(c)所示。

为了实现完美的聚焦特性[21],应实现透镜在不同径向位置的相分布。在所设计的透镜上,任意位置 (*x*, *y*)的相分布为:

$$\phi_{\text{total}} = \phi = k_0 \left( \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f \right)$$
(7)

其中, f为理论焦距,  $\sqrt{x^2 + y^2}$ 为从任意位置点到透镜中心的径向距离。在透镜的设计中, 每个单元的 相位都可以通过式(7)来确定。



**Figure 1.** (a) Unit nanostructure: period P, length L, width W, height H; (b) Geometric phase nanopillar rotated by an angle  $\theta$ ; (c) Schematic of the focusing lens

图 1. (a) 单元纳米结构:周期 P、长度 L、宽度 W、高度 H; (b) 几何相位纳米柱以角度  $\theta$  旋转; (c) 聚焦透镜示意图

# 3. 超透镜仿真结果

## 3.1. 双焦点超透镜

本文设计的可调超透镜是基于可调谐材料 GO 来实现调控的。GO 的带隙较大,含有大量含氧官能 团,而经热或激光还原后,其π电子体系逐步恢复,导带与价带间隙减小,导致其复折射率(n + ik)显著 变化。根据 Drude 模型与 Kramers-Kronig 色散关系,该变化可近似用线性模型表示为:

$$n(\lambda, R) = n_{GO} + \alpha R; k(\lambda, R) = k_{GO} + \beta R$$
(8)

式中 $R \in [0,1]$ 表示还原程度。文献研究表明[22][23],在可见波段,该方式可实现折射率的调控,调节精度可达 $\Delta n = 0.01$ ,具有良好的可重复性和环境稳定性。

因此,根据第二章介绍的原理,首先利用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain,FDTD)对单元结构进行扫描,如图 1(a)所示,周期 P = 500 nm,长度和宽度的扫描范围是 50 nm~450 nm,透射率 T 和相位 phi 如图 2(a)和图 2(b)所示,在选择单元结构尺寸的时候保证透射率 >80%,相位覆盖 0~2 $\pi$  达到 对波前状态的完全控制。然后利用 MATLAB 计算了波长  $\lambda$  为 632 nm 下实现双焦点超透镜的相位运算分 布。针对 rGO 设计透镜半径 r = 10  $\mu$ m,高度 H = 700 nm,长度 L = 230 nm,宽度 W = 110 nm,焦点位 置(±5  $\mu$ m,0),焦距 f = 15  $\mu$ m。将此参数在 FDTD 中构建模型进行仿真模拟,在 x 和 y 方向上,边界条件 设置周期性分布,而在 z 方向,则采用吸收边界条件以避免非物理反射干扰,设置的光源为线偏振光,波长为 632 nm,仿真精度设置为 5 nm,衬底范围要稍大于在 x-y 平面仿真区域,这样是为了避免谐振影响。仿真结果如图 2(c)和图 2(d)所示。



Figure 2. Refractive index n = 2.8: (a) Unit structure scanning transmittance T; (b) Unit structure scanning phase Phi; (c) Simulation results of focusing x-z plane of metalens; (d) Simulation results of focusing x-y plane of metalens
图 2. 折射率 n = 2.8: (a) 单元结构扫描透射率 T; (b) 单元结构扫描相位 Phi; (c) 超透镜聚焦 x-z 平面的仿真结果; (d) 超透镜聚焦 x-y 平面的仿真结果

然后根据氧化石墨烯材料被激光还原之后会发生折射率的变化,设计了折射率 n = 2~3.6,间隔 Δn = 0.2。x-z 平面的仿真结果如图 3 所示,随着折射率 n 逐渐增大,焦点强度也逐渐增加。当折射率 n 达到 n

= 2.8 时,强度达到最大值,半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 0.6 μm 和 0.52 μm。然而,继续增大折射率 n,焦点强度会随之减小。在实验过程中,可以通过调整激光功率 P 来控制氧化石墨烯的还原程度,也就是对折射率 n 的控制。随着激光功率 P 的增大,氧化石墨烯的还原程度提高,通过在加工过程中对激光加工参数的精确控制,可以实现目标氧化石墨烯的折射率 n,从而制备加工可调谐的超透镜。





在设计过程中,考虑到高度 H 会对超透镜的聚焦效率、数值孔径(NA)和像差特性等造成影响。因此 设计了高度 H = 100 nm~1500 nm,间隔  $\Delta$ H = 200 nm,折射率 n = 2.8,结果如图 4 所示。当高度 H = 100 nm 时,超透镜不聚焦,这是因为此时相位调制量显著较小,导致无法覆盖 0~2 $\pi$  的完整相位范围。同时, 较低的结构高度限制了光与物质的相互作用长度,使等效折射率 n<sub>eff</sub>的调控能力下降,且难以支持高阶谐 振模式,最终造成衍射效率不足和聚焦功能失效。当高度逐渐增加,超透镜的聚焦性能呈现显著提升的 趋势,因为合适的纳米结构增强了光场局域能力,从而提升对入射光波前的调控效率。继续增大高度 H, 当高度 H = 700 nm 时,超透镜聚焦效应最好,当 H = 900 nm 时,虽然聚焦强度最大,但是在 f = 15  $\mu$ m 处基本无聚焦现象。值得注意的是,聚焦效果的改善并非单调递增,当高度超过 700 nm 后继续增加高度, 过高的纳米结构会激发非期望的高阶衍射模式,导致能量从基模向高阶模泄露,从而降低主焦点的光场 集中度;其次,随着高度的增加,原本设计的亚波长结构可能逐渐失去有效介质特性,引发显著的电磁 耦合效应和近场干扰,破坏设计的相位分布;更重要的是,单元结构的高度与横向尺寸比例失调会改变 其等效电磁响应特性,使得实际实现的相位调制偏离设计目标。



**Figure 4.** With L = 230 nm and W = 110 nm, the height H changes and the distribution of focused light field changes **图 4.** L = 230 nm, W = 110 nm 结构下高度 H 的变化和聚焦光场的分布变化

基于折射率 n=2.8 设计的超透镜结构已成功验证其光学性能,为进一步拓展调控自由度,本研究继 而构建了折射率 n=2.3 下的超透镜结构。通过精确调控 n=2.3 材料的几何参数与空间排布,实现了与 n=2.8 结构具有相同工作波长但不同聚焦特性的超透镜设计。同样先利用 FDTD 对单元结构扫描,单元周 期 P=500 nm,长度 L 和宽度 W 的扫描范围为 50 nm~450 nm,结果如图 5 所示。然后利用 MATLAB 计 算了波长  $\lambda$  为 632 nm 下实现双焦点超透镜的相位运算分布。针对 GO 设计透镜半径 r=10 µm,高度 H=700 nm,长度 L=440 nm,宽度 W=130 nm,焦点位置(0,±5 µm),焦距 f=15 µm。仿真计算结果如图 5 所示,y-z 平面可以观察到电磁场能量沿光轴(z 方向)呈现非均匀分布,其强度最大值出现在设计焦距 f=

15 μm 的位置, 且沿 y 方向具有特定的扩展模式; x-y 平面可以观察到在(0,-5 μm)、(0,5 μm)两点处, 其 FWHM 分别为 0.56 μm 和 0.58 μm。



**Figure 5.** Refractive index n = 2.3: (a) Structural scanning transmittance T; (b) Structure scanning phase Phi; (c) x-z plane of simulation results of bifocal metalens imulation results of bifocal metalens; (d) x-y plane of simulation results of bifocal metalens 图 5. 折射率 n = 2.3: (a) 结构扫描透射率 T; (b) 结构扫描相位 Phi; (c) 双焦点超透镜仿真结果 x-z 平面; (d) 双焦 点超透镜仿真结果 x-y 平面

#### 3.2. 折射率调控的可调多焦点超透镜

根据 3.1 章按照折射率 n 不同设计的两种不同结构,依据设计的区域划分设置在同一个超透镜上。 为实现多焦点调控功能,本研究将超透镜的工作区域划分为四个对称分布的扇形分区,如图 6(a)所示, ·通过精确控制各区域的折射率分布实现相位调控。具体而言,第一(θ∈[0°,90°))和第四(θ∈[270°,360°))分 区采用折射率为 n<sub>1</sub> = 2.3 的氧化石墨烯材料,而第二(θ∈ [90°, 180°))和第三(θ∈ [180°, 270°))分区则采用 n<sub>2</sub> =2.8 的还原氧化石墨烯材料。这种交替排列的折射率分布设计主要基于以下考虑:首先,n<sub>1</sub>和 n<sub>2</sub>的合理 差值( $\Delta n = 0.5$ )可产生足够的相位突变( $\Delta \varphi \approx \pi/2$ ),确保相邻分区间的波前连续性。通过 FDTD 仿真验证, 该分区设计在 632 nm 波长的线性偏振光下可同时形成四个分离的焦点。但是,如图 6(d)所示,除了主焦 点外,还会出现一些强度较弱的干扰光斑。形成的原因可能是当入射偏振光照射到超透镜表面时,由于 纳米柱的相对位置及其间相互耦合作用,会使得局部电场的相位和强度受到耦合的影响[24],导致在焦点 区域形成一些强度较弱的干扰光斑。后期继续研究过程中应适当增大纳米柱之间的间距,减少近场耦合 效应带来的影响;造成影响的原因还有可能是高阶衍射效应[25] [26],因为高阶衍射效应通常出现在周期 性结构中,尤其是当周期 P 与光波长  $\lambda$  相近时( $P/\lambda = 0.79$ ),衍射的高阶效应更为显著,可以通过调整 周期 P 或者优化设计以减小高阶衍射的影响。然后调整入射光的偏振状态,用左旋圆偏振光(Left-Handed Circularly Polarized Light, LCP)和右旋圆偏振光(Right-Handed Circularly Polarized Light, RCP)入射,结果如 图 6(e)、图 6(f)所示。当 LCP 入射时,有两个焦点(-5 µm,0)、(0,-5 µm),而当 RCP 入射,聚焦在另外 两点(0,5μm)、(5μm,0)。在实验过程中可以通过控制激光器加工的功率 P 与扫描速度 v 来控制氧化石墨



烯的还原程度,从而调控可调谐材料的折射率 n,实现设计的可调多焦点超透镜。这种分区策略为多功能 超透镜的设计提供了新思路,特别适用于需要多平面成像或光束分束的应用场景。

**Figure 6.** (a) Focusing diagram of structurally adjustable metalens; (b) x-z plane simulation results of linearly polarized multi-focus metalens; (c) y-z plane simulation results of linearly polarized multi-focus metalens; (d) x-y plane simulation results of linearly polarized multi-focus metalens; (d) x-y plane simulation results of linearly polarized multi-focus metalens; (e) x-y plane simulation results of left-circularly polarized multi-focus metalens; (f) x-y plane simulation results of right-handed circularly polarized light multi-focus metalens **图 6.** (a) 结构可调超透镜聚焦示意图; (b) 线偏振光多焦点超透镜 x-z 平面仿真结果; (c) 线偏振光多焦点超透镜 y-

图 6. (a) 结构可调超透镜聚焦示息图; (b) 线幅振元多焦点超透镜 x-2 平面仿真结果; (c) 线幅振元多焦点超透镜 yz 平面仿真结果; (d) 线偏振光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (e) 左旋圆偏振光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (f) 右旋圆偏振光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果

#### 3.3. 多波长偏振可调谐超透镜

根据第二章介绍的原理以及 3.1 章节中设计的双焦点超透镜方法,针对  $\lambda_1 = 632$  nm 和  $\lambda_2 = 532$  nm 分 别设计对应的结构尺寸实现聚焦超透镜。然后将两种尺寸结构在超透镜上分区域周期性排列,如图 7(a) 所示。具体而言,第一(θ ∈ [0°,90°))和第二(θ ∈ [90°,180°))分区采用波长  $\lambda_1 = 632$  nm 的结构,而第三(θ ∈ [180°,270°))和第四(θ ∈ [270°,360°))分区则采用波长  $\lambda_2 = 532$  nm 的结构。其结构周期 P = 2 µm,透镜的半径 r = 120 µm,焦距 f = 600 µm。结构 1 的长度 L<sub>1</sub> = 1 µm,宽度 W<sub>1</sub> = 1.3 µm,结构 2 的长度 L<sub>2</sub> = 1.25 µm,宽度 W<sub>2</sub> = 0.95 µm。为方便后期实验验证过程中的制备,将高度统一为 H = 600 nm。通过 FDTD 仿 真验证,如图 7(b)~(h)所示结果图。当使用波长  $\lambda_1 = 632$  nm 的线性偏振光照射超透镜的表面,仿真结果 x-z 平面可以观察到其在 z = 600 nm 处聚焦,但是发现右侧的焦点聚焦位置稍微偏离 z = 600 nm,如图 7(b)所示。x-y 平面可以观察到其在 x = ±50 µm 透镜聚焦,但是发现右侧的焦点比左边的焦点强度弱,造成这样的原因可能是结构尺寸之间的耦合作用影响较大。当使用波长  $\lambda_2 = 532$  nm 的线性偏振光照射超透镜的表面,如图 7(f)所示,x-y 平面仿真结果表明其在 y = ±50 µm 处有聚焦点。然后通过改变偏振光的偏振状态实现焦点之间的变化,结果如图 7(d)、图 7(e)、图 7(g)和图 7(h)所示。这种可调超透镜在实验中同样需要控制激光加工的功率及速率,但是它不需要在加工过程中改变加工功率,比 3.2 章节中的制备简单。这种透镜可以结合可见光与近红外波段,实现组织穿透成像(如血管、肿瘤检测)、多荧光标记分析、在显微或内窥镜中快速切换观测波段。



**Figure 7.** (a) Focusing diagram of multi-wavelength tunable metalens; (b) x-z plane simulation results of 632 nm linearly polarized light multi-focus metalens; (c) x-y plane simulation results of 632 nm linearly polarized multi-focus metalens; (d) x-y plane simulation results of 632 nm left-circularly polarized multi-focal metalens; (e) x-y plane simulation results of 632 nm right-handed circularly polarized multi-focal metalens; (f) x-y plane simulation results of 532 nm linearly polarized light multi-focus metalens; (g) x-y plane simulation results of 532 nm left-circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens; (h) x-y plane simulation results of 532 nm right-handed circularly polarized multi-focus metalens;

**图 7.** (a) 多波长可调超透镜聚焦示意图; (b) 632 nm 线偏振光多焦点超透镜 x-z 平面仿真结果; (c) 632 nm 线偏振光 多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (d) 632 nm 左旋圆偏振光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (e) 632 nm 右旋圆偏振 光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (f) 532 nm 线偏振光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (g) 532 nm 左旋圆偏振光 多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果; (h) 532 nm 右旋圆偏振光多焦点超透镜 x-y 平面仿真结果

# 4. 总结

本文基于几何相位与传输相位的调控原理,实现多焦点功能的动态可调谐特性。设计了两种可调谐 超透镜,首先,利用可调谐材料 GO 的光学响应特性,在激光调控下精确调整超透镜纳米单元的等效折 射率,从而实现对固定波长线偏振入射光束的相位调制。仿真结果表明,该可调超透镜在工作波长 632 nm 下可实时调控焦点位置和数量,其聚焦性能通过严格的电磁仿真验证,展现出良好的光束调控能力。 然后,利用偏振状态的改变,实现在可见光下多波长可调多焦点超透镜。本研究为重构光学系统提供了 新的设计方法,对发展动态光束调控、自适应成像等技术具有重要价值,同时为分析可调谐超表面对特 定波长光束的相位调控机制奠定了理论基础。

# 参考文献

- Yu, N., Genevet, P., Kats, M.A., Aieta, F., Tetienne, J., Capasso, F., *et al.* (2011) Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction. *Science*, **334**, 333-337. https://doi.org/10.1126/science.1210713
- [2] Sun, S.L., He, Q., Xiao, S.Y., et al. (2013) Research Progress on Gradient Meta-Surfaces. Laser & Optoelectronics Progress, 50, Article 080009. <u>https://doi.org/10.3788/lop50.080009</u>
- [3] Yang, W., Xiao, S., Song, Q., Liu, Y., Wu, Y., Wang, S., *et al.* (2020) All-Dielectric Meta-Surface for High-Performance Structural Color. *Nature Communications*, **11**, Article No. 1864. <u>https://doi.org/10.1038/s41467-020-15773-0</u>
- [4] Fan, Q., Wang, D., Huo, P., Zhang, Z., Liang, Y. and Xu, T. (2017) Autofocusing Airy Beams Generated by All-Dielectric Meta-Surface for Visible Light. *Optics Express*, 25, 9285-9294. <u>https://doi.org/10.1364/oe.25.009285</u>
- [5] Guo, Z., Zhu, L., Guo, K., Shen, F. and Yin, Z. (2017) High-Order Dielectric Meta-Surfaces for High-Efficiency Polarization Beam Splitters and Optical Vortex Generators. *Nanoscale Research Letters*, **12**, Article No. 512. https://doi.org/10.1186/s11671-017-2279-2
- [6] Lin, Z., Huang, L., Xu, Z.T., Li, X., Zentgraf, T. and Wang, Y. (2019) Four-Wave Mixing Holographic Multiplexing Based on Nonlinear Meta-Surfaces. *Advanced Optical Materials*, 7, Article 1900782. https://doi.org/10.1002/adom.201900782
- [7] Arbabi, A., Horie, Y., Ball, A.J., Bagheri, M. and Faraon, A. (2015) Subwavelength-Thick Lenses with High Numerical Apertures and Large Efficiency Based on High-Contrast Transmit Arrays. *Nature Communications*, 6, Article No. 7069. <u>https://doi.org/10.1038/ncomms8069</u>
- [8] Wang, J., Ma, J., Shu, Z., Hu, Z. and Wu, X. (2019) Terahertz Meta-Lens for Multi-Focusing Bidirectional Arrangement in Different Dimensions. *IEEE Photonics Journal*, **11**, 1-11. <u>https://doi.org/10.1109/jphot.2019.2890903</u>
- [9] Xing, T., Bai, T., Tang, Y., Lu, Z., Huang, Y., Balmakou, A., *et al.* (2020) Characteristics of a Bidirectional Multifunction Focusing and Plasmon-Launching Lens with Multiple Periscope-Like Waveguides. *Optics Express*, 28, Article 20334. <u>https://doi.org/10.1364/oe.395816</u>
- [10] Azad, A.K., Efimov, A.V., Ghosh, S., Singleton, J., Taylor, A.J. and Chen, H. (2017) Ultra-Thin Meta-Surface Microwave Flat Lens for Broadband Applications. *Applied Physics Letters*, **110**, Article 224101. https://doi.org/10.1063/1.4984219
- [11] Lv, S., Jia, J., Luo, W. and Li, X. (2021) Design and Research of Dual-Wavelength Polarization Multiplexing Multifocal Meta-Lens Based on Superimposed Nano-Antenna Array. *Materials Research Express*, 8, Article 115802. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac39c3
- [12] Wang, W., Yang, Q., He, S., Shi, Y., Liu, X., Sun, J., et al. (2021) Multiplexed Multi-Focal and Multi-Dimensional SHE (Spin Hall Effect) Meta-Lens. Optics Express, 29, Article 43270. <u>https://doi.org/10.1364/oe.446497</u>
- [13] Du, K., Barkaoui, H., Zhang, X., Jin, L., Song, Q. and Xiao, S. (2022) Optical Meta-Surfaces towards Multifunctionality and Tunability. *Nanophotonics*, **11**, 1761-1781. <u>https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0684</u>
- [14] Wang, Q., Rogers, E.T.F., Gholipour, B., Wang, C., Yuan, G., Teng, J., et al. (2015) Optically Reconfigurable Meta-Surfaces and Photonic Devices Based on Phase Change Materials. *Nature Photonics*, 10, 60-65. <u>https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.247</u>
- [15] Li, P., Yang, X., Maß, T.W.W., Hanss, J., Lewin, M., Michel, A.U., et al. (2016) Reversible Optical Switching of Highly Confined Phonon-Polaritons with an Ultrathin Phase-Change Material. *Nature Materials*, 15, 870-875. <u>https://doi.org/10.1038/nmat4649</u>
- [16] Wang, H., Hao, C., Lin, H., Wang, Y., Lan, T., Qiu, C., et al. (2021) Generation of Super-Resolved Optical Needle and Multifocal Array Using Graphene Oxide Meta-Lenses. Opto-Electronic Advances, 4, 200031-200031. https://doi.org/10.29026/oea.2021.200031
- [17] Chen, Y., Ding, Y., Yu, H. and Li, X. (2024) Design of an Achromatic Graphene Oxide Meta-Lens with Multi-Wavelength for Visible Light. *Photonics*, 11, Article 249. <u>https://doi.org/10.3390/photonics11030249</u>
- [18] Zhang, X., Li, Q., Liu, F., Qiu, M., Sun, S., He, Q., et al. (2020) Controlling Angular Dispersions in Optical Meta-Surfaces. Light: Science & Applications, 9, Article No. 76. <u>https://doi.org/10.1038/s41377-020-0313-0</u>
- [19] Castillo-Orozco, E., Kumar, R. and Kar, A. (2019) Laser-Induced Subwavelength Structures by Microdroplet Super-Lens. Optics Express, 27, 8130-8142. <u>https://doi.org/10.1364/oe.27.008130</u>
- [20] Yu, N. and Capasso, F. (2014) Flat Optics with Designer Meta-Surfaces. Nature Materials, 13, 139-150. https://doi.org/10.1038/nmat3839
- [21] Li, J., Jin, R., Geng, J., Liang, X., Wang, K., Premaratne, M., et al. (2019) Design of a Broadband Meta-Surface Luneburg Lens for Full-Angle Operation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67, 2442-2451.

https://doi.org/10.1109/tap.2018.2889006

- [22] Jahanbakhshian, M., Yadi, M., Adami, S. and Karimzadeh, R. (2017) The Effect of Laser Reduction Process on the Optical Response of Graphene Oxide. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 13888-13895. <u>https://doi.org/10.1007/s10854-017-7237-3</u>
- [23] Yan, L., Zhang, J., Wang, M. and Nie, Z. (2022) Boosting Optical Nonlinearities of Graphene Oxide Films by Laser Direct Writing. *Optical Materials*, **128**, Article 112454. <u>https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112454</u>
- [24] Choi, M., Park, J., Shin, J., Keawmuang, H., Kim, H., Yun, J., et al. (2024) Realization of High-Performance Optical Meta-Surfaces over a Large Area: A Review from a Design Perspective. npj Nanophotonics, 1, Article No. 31. https://doi.org/10.1038/s44310-024-00029-2
- [25] He, J., Liu, H., Zhao, D., Mehta, J.S., Qiu, C., Sun, F., et al. (2024) High-Order Diffraction for Optical Superfocusing. *Nature Communications*, 15, Article No. 7819. <u>https://doi.org/10.1038/s41467-024-52256-y</u>
- [26] Zhong, R., Ling, J., Li, Y., Yang, X. and Wang, X. (2025) Design of Meta-Surface Lens Integrated with Pupil Filter. Acta Physica Sinica, 74, Article 044205. <u>https://doi.org/10.7498/aps.74.20241490</u>