

基于氧化石墨烯的可调多焦点超透镜设计

李 辩, 王金凤, 孙明宇*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2023年4月23日; 录用日期: 2023年7月12日; 发布日期: 2023年7月19日

摘 要

基于超表面设计的超透镜可以调制光的振幅、相位和偏振, 并获得多种新颖的聚焦效果, 近年来受到广泛关注。受制于材料调控与光场调制的局限, 常见的超透镜多表现出静态单一的光场聚焦效果。本文基于氧化石墨烯材料可调制光学性质, 采用时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD), 针对正交圆偏振设计超透镜, 通过模拟材料相变产生的折射率变化, 在焦点处表现出光强度可调能力, 并表现出几何相位与传输相位共同影响的聚焦机制。同时, 对超透镜进行多区域设计, 在不同偏振状态光的入射下实现独立聚焦效果, 为实现多焦点、可调超透镜功能器件的设计提供了重要依据。

关键词

超表面, 几何相位, 多焦点调控, 氧化石墨烯

Design of Adjustable Multi-Focus Metalens Based on Graphene Oxide

Bian Li, Jinfeng Wang, Mingyu Sun*

School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 23rd, 2023; accepted: Jul. 12th, 2023; published: Jul. 19th, 2023

Abstract

The metalens designed based on the metasurface can modulate the amplitude, phase and polarization of light and obtain a variety of novel focusing effects, which have received widespread concern in recent years. Due to the limitation of the material regulation and light field modulation,

*通讯作者。

common metalens often shows the static light field focusing ability. Based on the tunable optical properties of graphene oxide, the orthogonal circularly polarized independent focusing metalens is designed by using the finite-difference time-domain (FDTD) algorithm. By simulating the change of refractive index caused by material phase change, the focal point of the lens exhibits the ability to adjust the light intensity, and shows the focusing mechanism of the joint influence of geometric phase and transmission phase. At the same time, independent focusing effect is achieved under the incidence of light in different polarization states through the multi-region design of the metalens, providing an important basis for the design of multifocus, adjustable metalens functional devices.

Keywords

Metasurface, Geometric Phase, Multi-Focus Regulation, Graphene Oxide

Copyright © 2023 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/>



Open Access

1. 引言

超表面是一种人工设计的周期性二维亚波长结构, 可通过光与单元结构的相互作用实现波前调控。传统光学元件通过传播相位机制往往需要较长光程来累积相位延迟实现光场调控。相比之下, 超表面可以在界面处引入不连续相位实现相位调制[1], 且可利用可调制单元结构来实现多维度及动态的调控, 表现出较大的研究与应用潜力。迄今为止, 报道的常见超表面器件包括光束偏转器[2]、超透镜[3] [4] [5]、隐形斗篷[6]、超表面全息图[7]等。其中, 超透镜利用超表面器件中光与材料相互作用, 实现聚焦器件的平面化、小型化等特点, 受到广泛关注。同时, 通过设计单元结构, 超透镜可实现部分传统器件难以实现的功能, 如宽波段[8]、消色差[9]、可调谐[10]等, 并实现集成。然而, 随着设计调制维度的增加以及加工尺度的微小化, 超透镜的设计与制备仍是研究的重要话题。

几何相位(Berry phase, PB phase)通过使用各向异性超表面单元结构, 实现交叉极化电磁波的完全相位控制。在前期的研究中, 超透镜利用几何相位实现对左旋圆偏振(LCP)和右旋圆偏振(RCP)光的独立调节[11]。但是, 这种方法根据入射光的偏振态与所需要的聚焦相位排列周期性单元结构, 对于设计好的超透镜结构, 只能适用一种偏振态的入射光, 无法满足 LCP 与 RCP 同时调控。近来有结果表明, 利用几何相位与传输相位相结合设计超透镜, 光的 LCP 与 RCP 分别受到超表面单元结构的长轴与短轴、空间方位角及材料参数的共同影响, 能够在空间上改变电磁波的方向, 实现对上述两种偏振态的独立控制[12], 以及偏振复用的聚焦功能。2015年, Arbabi 等人提出利用电介质超表面实现偏振的独立调控, 通过琼斯矩阵计算每个单元结构的长短轴和方位角, 设计任意位置的单元结构参数, 分别实现正交偏振态分束和聚焦功能[13]。2017年, F. Capasso 团队提出一种独立调控 LCP 和 RCP 光波前的新方法: 利用高折射率介质柱同步调控传输相位和几何相位, 再通过两者的复合实现对任意两正交偏振的独立调控[14]。2021年 Yao 等人设计了一种螺旋相关的多焦点超透镜, 该结构可以独立地将入射 LCP 和 RCP 太赫兹波在输出平面产生多个焦点[15]。此外, 聚焦光场可调也是该领域的另一个重要探索话题。通常的做法是利用材料相变, 如石墨烯、二维材料、各向异性液晶等, 产生折射率调制实现光场调控能力。2018年, Liu 等人提出了一种基于相位调制的电控石墨烯太赫兹超透镜, 通过电压控制石墨烯折射率, 实现焦距动态

调节[16]。2020年, Zhou等人提出并在实验上证明了毫米尺度的可变相对强度的横向和纵向液晶双焦点透镜, 虽然液晶可以集成到超构透镜中来调节焦距, 但难以实现连续变焦能力或高聚焦效率[17]。2021年, Qin等人在可见光波段提出了一种基于光电材料钛酸钡(BaTiO₃, BTO)的通过高速电调制实现强度可调的双焦超透镜, 两个焦点的强度比可以通过施加0到60 V范围内的不同电压来调节, 然而双层结构在实际加工中难度很高, 不利于集成[18]。

本文提出一种利用氧化石墨烯设计偏振独立控制超透镜, 并获得焦点可调制的方法。通过激光直写等手段, 氧化石墨烯可获得不同程度的还原, 表现出折射率的变化。利用FDTD仿真模拟出LCP、RCP以及线偏振态(XLP)入射光场下的超透镜光场聚焦效果, 探究其实现同步控制LCP、RCP聚焦能力。通过调节透镜阵列单元的折射率变化, 研究超透镜聚焦光场分布及强度变化。此外, 利用多区域设计可满足多偏振通道超透镜的研究, 为实现多焦点、可调超透镜功能器件的设计提供思路。

2. 计算模型

电磁波的传播方向是由等相位面决定的, 相位调控是光场调控的关键。相位调制机制主要有传输相位型[3]、几何相位型及电路型[19]任意结合。传播相位调控通过光在传输过程中产生光程差来实现相位调控, 受结构尺寸影响, 且不依赖于偏振态控制。几何相位也称为Pancharatnam-Berry (PB)相位, 即通过调整天线的旋转角来实现相位控制。当入射光正向入射至一个各向异性的几何结构, PB相位可以利用琼斯矩阵推理, 即:

$$J = R(-\theta) \begin{pmatrix} e^{i\phi_x} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_y} \end{pmatrix} R(\theta) \quad (1)$$

其中 ϕ_x 与 ϕ_y 分别为线偏光沿长轴与短轴的相位变化。当 ϕ_x 与 ϕ_y 相位差为 π 时, 偏振转化效率最高, 即入射的圆偏振光会全部转化成与入射光旋向相反的偏振光, 相当于一个半波片。 θ 为几何单元相对于参考坐标系的旋转角, 当单元结构旋转 θ 时, 其结构变化可表示为:

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

当圆偏振光照射几何单元时, 出射电磁波可以表示为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} &= \frac{J_{meta}}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \frac{t_u + t_v}{2\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + \frac{t_u - t_v}{2\sqrt{2}} \exp(2i\sigma\theta) \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \\ &= \frac{t_u + t_v}{2} |\sigma\rangle + \frac{t_u - t_v}{2} \exp(2i\sigma\theta) |-\sigma\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\sigma = -1$ 与 $\sigma = 1$ 分别表示入射左旋圆偏振(LCP)与右旋圆偏振(RCP)态。

基于上式, 当左旋或右旋圆偏振态的电磁波入射几何单元时会产生一部分复振幅为 $\frac{t_u + t_v}{2}$ 的电磁波, 且与入射波偏振态相同。同时还会产生另一部分复振幅为 $\frac{t_u - t_v}{2} \exp(2i\sigma\theta)$ 的电磁波, 其偏振态与入射电磁波相反, 且携带 $2\sigma\theta$ 的附加相位, 即几何相位。几何相位的正负由入射电磁波的圆偏振态旋向决定, 且绝对值是各项异性单元结构旋转角 θ 的两倍。

基于上述几何相位工作原理, 人们可以设计超透镜结构对两种圆偏振光获得不同的焦点, 其工作示意图如图1所示。利用等光程差原理, 对于聚焦到任意空间位置的聚焦相位可以表示为:

$$\psi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(f - \sqrt{x^2 + y^2 + f^2} \right) \quad (4)$$

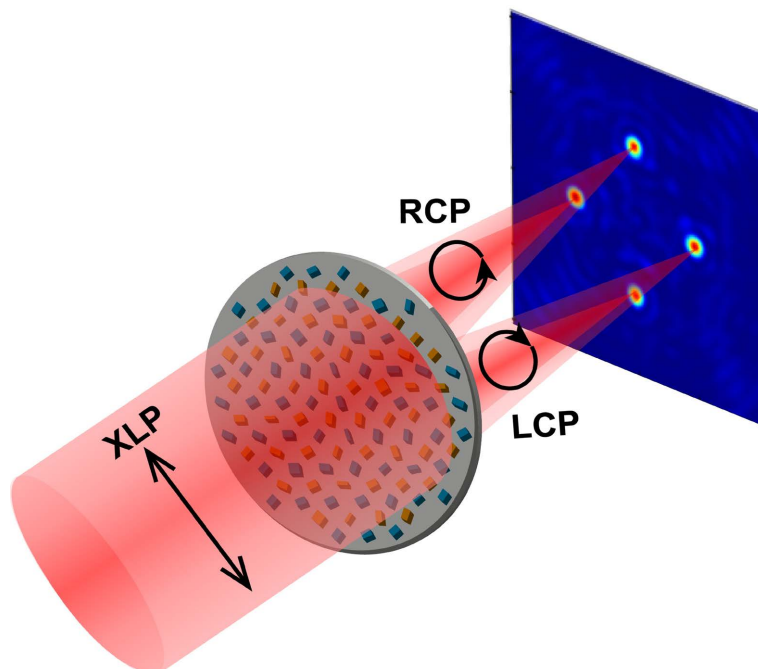


Figure 1. Schematic diagram of multiple focal points generated by linearly polarized incident metalens

图 1. 线偏振态照射超透镜产生多焦点的示意图

其中 f 为透镜焦距, λ 为工作波长, (x, y) 为超透镜中每个几何单元的平面坐标。由式(4)可知, 给定入射波长与设计焦距, 即可确定超透镜产生的聚焦相位。图 2 给出了几何单元结构示意图。当考虑入射的偏振态, 左旋圆偏振光与右旋圆偏振光的聚焦相位可分别表示为:

$$\psi_{LCP}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(f_L - \sqrt{(x - x_{0L})^2 + (y - y_{0L})^2 + f_L^2} \right) \quad (5)$$

$$\psi_{RCP}(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(f_R - \sqrt{(x - x_{0R})^2 + (y + y_{0R})^2 + f_R^2} \right) \quad (6)$$

其中 (x_{0L}, y_{0L}) 和 f_L 分别为左旋圆偏振光入射时的设计焦点位置坐标与焦距, (x_{0R}, y_{0R}) 与 f_R 分别为右旋圆偏振光入射时的设计焦点位置坐标与焦距。

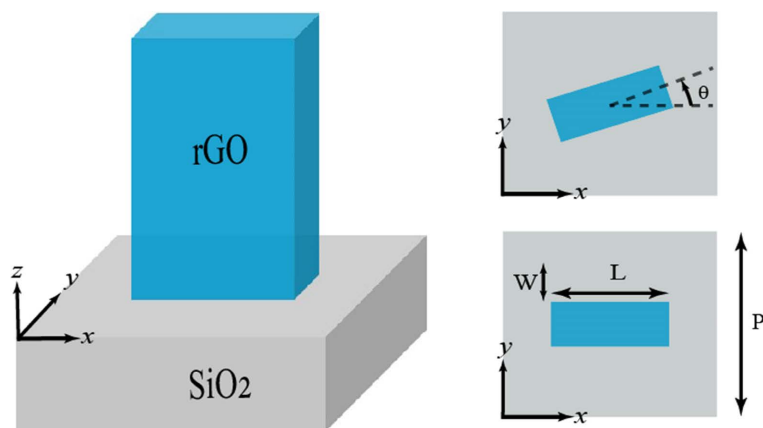


Figure 2. Schematic diagram of metalens unit structure and spatial rotation angle

图 2. 超透镜单元结构与空间旋转角度示意图

传输相位依赖单元结构几何尺寸，不同的偏振态入射光产生的传输相位相同。相比之下，几何相位的调制依赖单元结构旋转角度变化，对于两个圆偏振光入射产生的几何相位是等值反向的。出射光中包含传输相位以及不同偏振态下携带额外几何相位，携带有几何相位的 LCP 与 RCP 的总相位分别是：

$$\psi_{RCP}(x, y) = \phi(x, y) - 2\theta(x, y) \quad (7)$$

$$\psi_{LCP}(x, y) = \phi(x, y) + 2\theta(x, y) \quad (8)$$

整理可得：

$$\phi(x, y) = \frac{\psi_{RCP}(x, y) + \psi_{LCP}(x, y)}{2} \quad (9)$$

$$2\theta(x, y) = \frac{\psi_{RCP}(x, y) - \psi_{LCP}(x, y)}{2} \quad (10)$$

因此，可以选择不同尺寸与不同旋转角度的单元结构来实现传输相位与几何相位的同步控制。人们利用传输相位实现光程调控，利用几何相位实现偏振态的独立控制，最终实现超透镜的可调控多焦点聚焦能力，具体的研究结果与讨论将在下文展开。

结构参数设计

我们首先利用 MATLAB 根据聚焦相位公式(4)计算超透镜目标相位值，并利 FDTD 对单元结构参数进行优化。根据已报道结果，激光直写等手段可实现氧化石墨烯的还原相变。依照不同还原程度，材料折射率在近红外波段从 2.7 增大到 4.2 [20]。优化模型并设计作波长为 950 nm，超透镜单元结构折射率设定为 $n = 3.5$ ，基底材料折射率为 1.5，分别模拟还原态石墨烯与玻璃基底材料性质。在 FDTD 仿真模型中，结构周期 P 设置为 520 nm，高度 H 设置为 750 nm。 x 与 y 方向采用周期性边界条件， z 方向为完美匹配层(PML)边界条件。通过对几何单元的长度 L 和宽度 W 在 50~450 nm 之间进行优化计算，获得相应的透射率与相位分布。图 3 所示，选取可同时满足 90%以上透射率及 $\phi_x = 0 \sim 2\pi$ 相位分布范围的结构参数，满足透镜聚焦设计要求。其中，根据图 3 结果将 $0 \sim 2\pi$ 相位分成八阶选取参数，即每个相邻参数单元结构相位差满足 $\pi/4$ 。

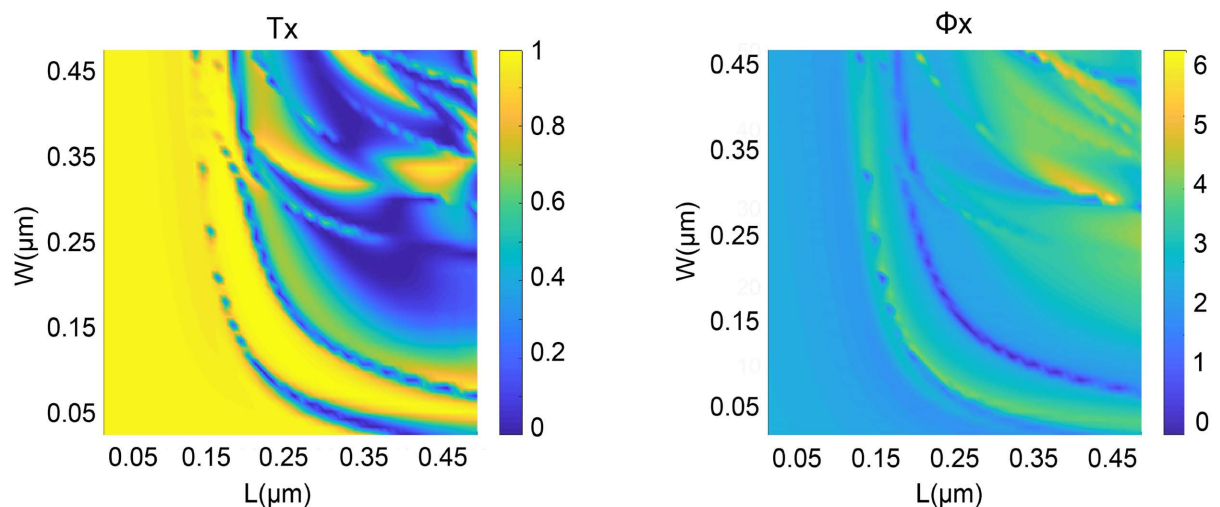


Figure 3. Optimization of geometric unit structure and transmittance and phase distribution results: (a) normalized transmittance; (b) phase (rad)

图 3. 几何单元的结构优化及其透过率与相位分布结果：(a) 归一化透射率；(b) 相位(rad)

3. 结果与讨论

3.1. 正交圆偏振态的双焦点控制

根据上述方法, 超透镜单元结构折射率设置为 $n = 3.5$, 以模拟还原态石墨烯特点。超透镜工作波长为 950 nm , 设计直径 $D = 10.2 \text{ }\mu\text{m}$, 焦距 $f = 20 \text{ }\mu\text{m}$ 。如图 4 所示, 对于 LCP 与 RCP 两个不同入射光偏振态, 分别获得独立的聚焦结果。其中, 设计超透镜将入射 LCP 光转换为 RCP 光并聚焦在点 $(-5.2 \text{ }\mu\text{m}, 0)$, 将入射 RCP 光转换为 LCP 光并聚焦在点 $(5.2 \text{ }\mu\text{m}, 0)$, 计算得到左右旋入射产生的焦点聚焦效率分别为

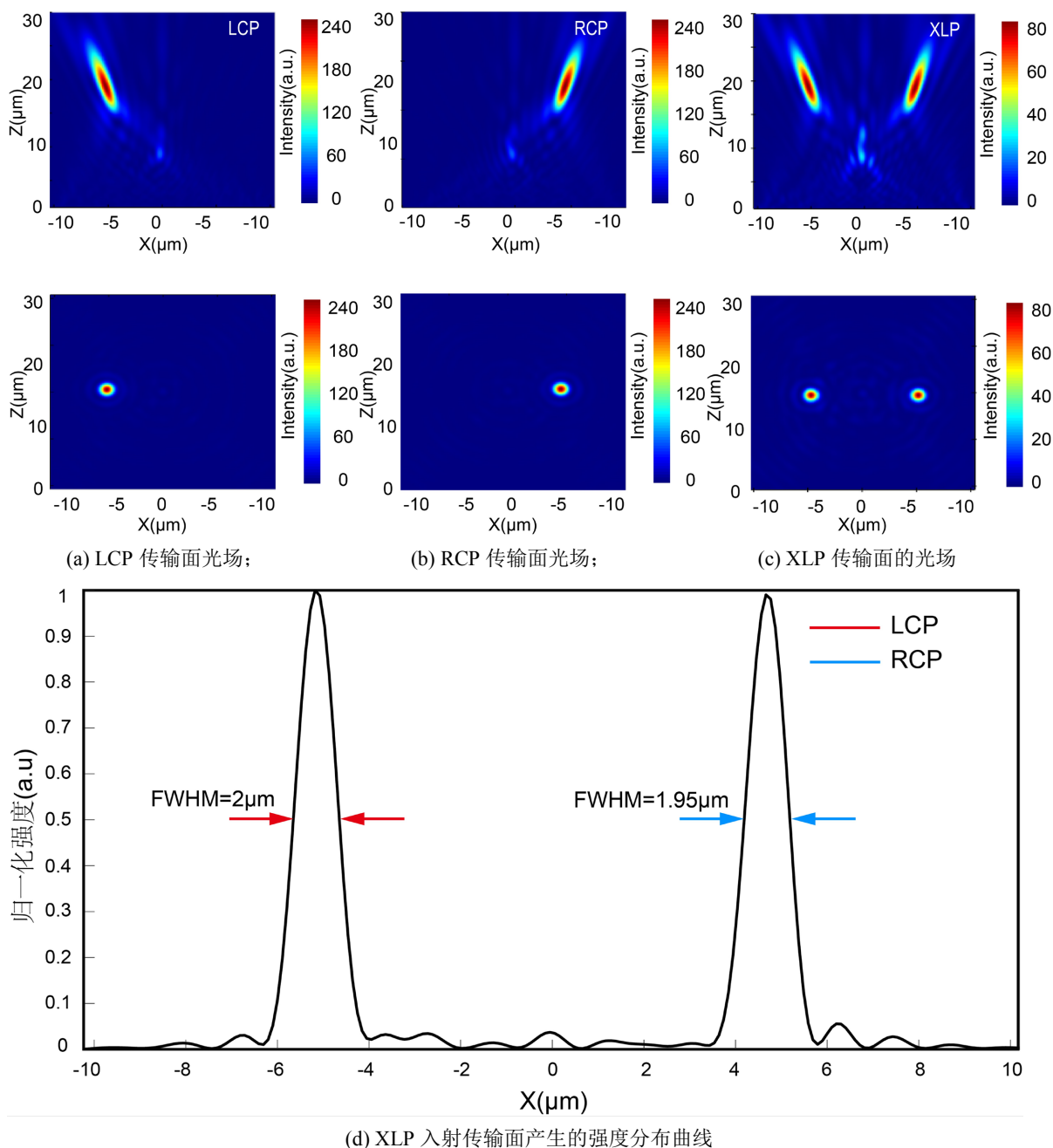


Figure 4. Distribution of the focused light field in a metalens with different polarization state incident light
图 4. 不同入射光偏振态的超透镜聚焦光场分布

48%与 51%。由于线偏振光可以被分解为振幅相同的 RCP 和 LCP 分量，即 XLP 光入射超透镜可同时聚焦 LCP 和 RCP 分量在对称位置 $(-5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $(5.2 \mu\text{m}, 0)$ 。计算得到 XLP 光入射 LCP 和 RCP 分量的聚焦效率分别 28%为 32%，低于 LCP 与 RCP 单独入射的聚焦效率，这是由于入射的 XLP 中 LCP 与 RCP 分量强度低于单独 LCP 与 RCP 入射的强度。其中，LCP 分量聚焦在 $(-5.2 \mu\text{m}, 0)$ ，RCP 分量聚焦在 $(5.2 \mu\text{m}, 0)$ 。

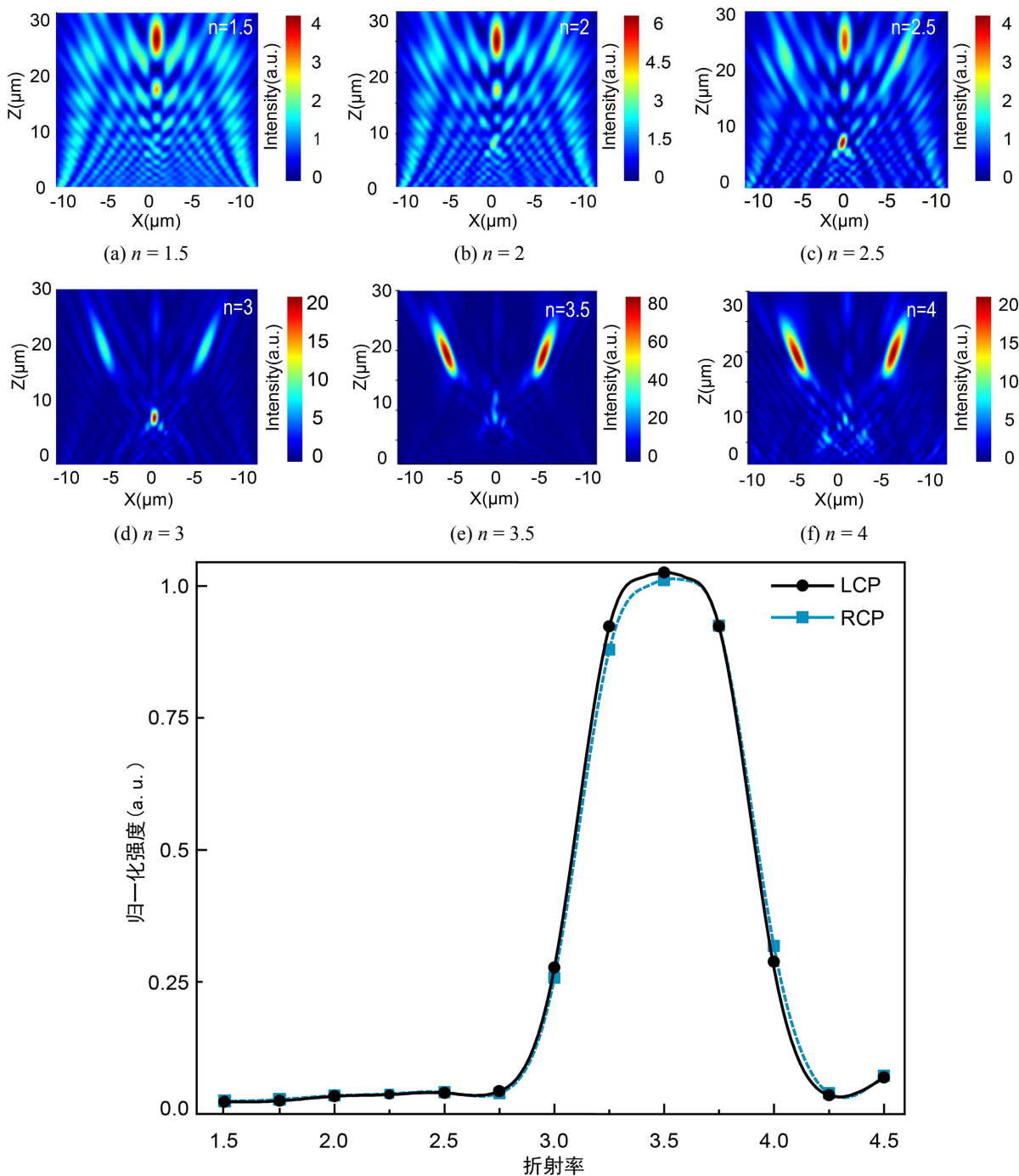


Figure 5. Intensity distribution of light field with different refractive under linear polarization incident
图 5. 具有不同折射率在线性偏振入射作用下光场强度分布

其中如图 4(c)所示, $x-z$ 平面上两个对称焦点的电场强度及半高全宽(FWHM)几乎相等, 且两个聚焦光斑的 FWHM 尺寸均接近分辨率极限, 表现出很好的聚焦效果。

3.2. 相变导致的焦点调制

石墨烯是一种二维蜂窝状结构的碳原子层, 有着独特光学和电学特性的二维半导体材料[21]。氧化石墨烯(GO)作为石墨烯的衍生物, 具有强稳定性、快响应和易制造等特点。特别是近年来通过超快激光直写氧化石墨烯等手段可获得不同还原程度的石墨烯, 根据氧化石墨烯材料被激光还原之后折射率的变化, 设计了折射率为 $n = 2.5$ 、 3 、 3.5 、 4 的超透镜结构, 其聚焦效果如图 5 所示。以 3.1 节中设计的双焦超透镜为例, 对于 XLP 入射, 可产生 $f = 20 \mu\text{m}$ 的双焦点, 焦点位置为 $(-5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $(5.2 \mu\text{m}, 0)$ 。在结构折射率为 3.5 时, 焦点处光强最大, 聚焦效率可达 51%; 在结构折射率偏离 3.5 时, 焦点处光强逐渐减小, 但焦距几乎没有改变。之后, 我们进一步拓展计算结构折射率低至 1.5 和 2 时聚焦的情况, 结果表明双焦点现象显著减弱, 主要表现出零级光栅衍射的近似效果, 如图 5(g)所示, 聚焦光强随着结构折射率的减小而降低。当折射率低于 $n = 2.75$, 或高于 $n = 4.25$ 时, 焦点强度低至 5% 以下。上述结果表明, 超透镜的聚焦过程同时受到了结构传播相位与几何相位的共同影响。折射率的偏差改变聚焦光束间的光程匹配关系, 光斑聚焦的效率出现变化, 这一结果也为实现可调超透镜的设计提供了依据。

3.3. 多焦点调控

利用对透镜结构的折射率调制, 可以分别针对 LCP 与 RCP 不同偏振态的聚焦效果进行控制。受此启发, 本文进一步设计具有更多焦点调控能力的可调超透镜。图 6 给出了满足四焦点可调超透镜聚焦结果。透镜平面设计成 A 与 B 两类区域, 分别产生 A_1 与 A_2 及 B_1 与 B_2 两组焦点, 利用透镜聚焦相位公式, 设计 A 组在 XLP 入射时的焦点位置为 $A_1 (-5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $A_2 (5.2 \mu\text{m}, 0)$, 其中 A 组在 LCP 入射时的焦点位置为 $A_1 (-5.2 \mu\text{m}, 0)$, 在 RCP 入射时的焦点位置为 $A_2 (0, 5.2 \mu\text{m})$ 。B 组在 XLP 入射时的焦点位置为 $B_1 (0, 5.2 \mu\text{m})$ 与 $B_2 (0, -5.2 \mu\text{m})$, 其中 B 组在 LCP 入射时的焦点位置为 $B_1 (0, 5.2 \mu\text{m})$, 在 RCP 入射时的焦点位置为 $B_2 (0, -5.2 \mu\text{m})$ 。首先设置超透镜 A 与 B 组结构材料折射率为 3.5, 由 3.2 节可知, 当材料折射

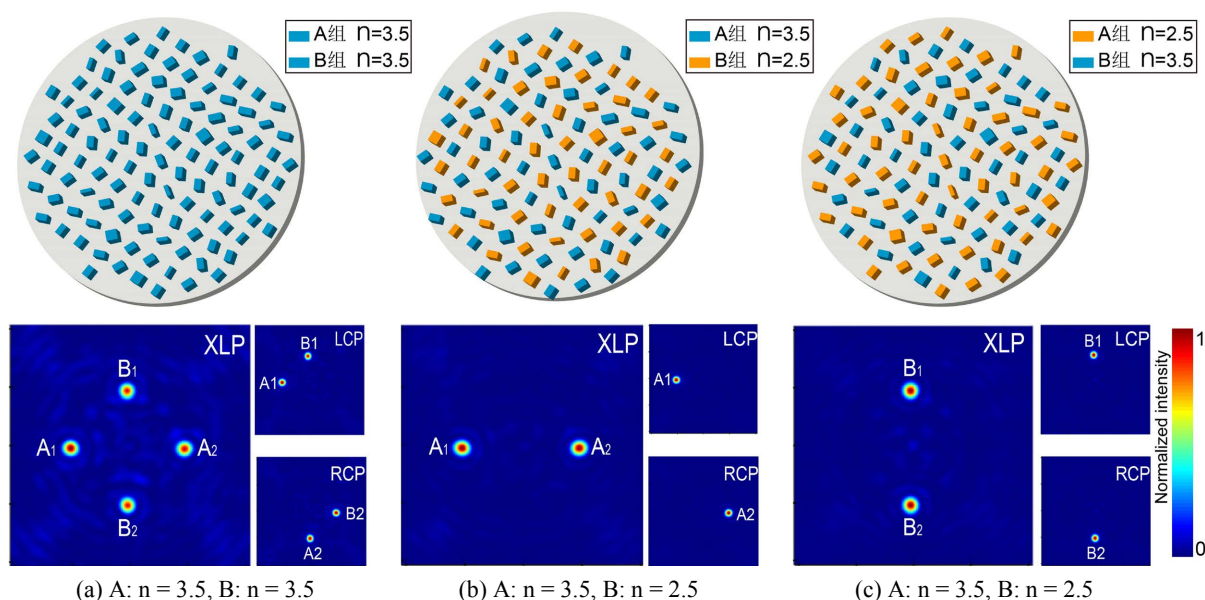


Figure 6. Diagram of multi-region metalens and multi-channel focusing achieved by refractive index modulation
图 6. 多区域超透镜的设计示意图及折射率调制实现多通道聚焦

率是 3.5 时, 焦点强度最大。如图 6(a)所示, XLP 入射时能够在焦平面上获得四个焦点 $A_1(-5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $A_2(5.2 \mu\text{m}, 0)$, $B_1(0, 5.2 \mu\text{m})$ 与 $B_2(0, -5.2 \mu\text{m})$ 。其中, LCP 和 RCP 分别独立产生焦点组 $A_1(-5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $B_1(0, 5.2 \mu\text{m})$, $A_2(5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $B_2(0, -5.2 \mu\text{m})$ 。当设置 A 组材料折射率为 3.5, B 组材料折射率为 2.5 时, 由于折射率 $n = 2.5$ 时聚焦效率低于 5%, 如图 6(b)所示, XLP 入射在焦平面上只有 $A_1(-5.2 \mu\text{m}, 0)$ 与 $A_2(5.2 \mu\text{m}, 0)$ 。之后, 设置 A 组材料折射率为 2.5, B 组材料折射率为 3.5, 如图 6(c)所示 XLP 入射时仅在焦平面产生焦点 $B_1(0, 5.2 \mu\text{m})$ 与 $B_2(0, -5.2 \mu\text{m})$, 分别对应 LCP 和 RCP 的聚焦结果。可以预期, 如果对更多区域进行折射率控制, 超透镜可以分别针对 LCP 和 RCP 获得更多焦点的可调聚焦能力。

4. 结论

综上所述, 本文基于氧化石墨烯及其还原态提出了一种可调多焦点超透镜设计方法。超透镜可实现对 LCP 和 RCP 的独立控制, 并可以通过调制几何单元的折射率实现对焦点的调控能力, 聚焦效果表现出了传输相位和几何相位共同影响的结果。利用多区域设计与折射率调制, 超透镜可实现针对不同偏振态通道的多焦点可调效果。这一研究结果为设计制备具有多通道、多焦点、动态可调等功能的新衍射器件提供了新的思路与依据。

参考文献

- [1] Yu, N., Genevet, P., Kats, M.A., *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] Ding, F., Deshpande, R. and Bozhevolnyi, S.I. (2018) Bifunctional Gap-Plasmon Metasurfaces for Visible Light: Polarization-Controlled Unidirectional Surface Plasmon Excitation and Beam Steering at Normal Incidence. *Light: Science & Applications*, **7**, 17178. <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.178>
- [3] Khorasaninejad, M., Zhu, A.Y., Roques-Carmes, C., *et al.* (2016) Polarization-Insensitive Metalenses at Visible Wavelengths. *Nano Letters*, **16**, 7229-7234. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03626>
- [4] 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. <https://doi.org/10.1038/ncomms8069>
- [5] Shalae, M.I., Sun, J., Tsukernik, A., *et al.* (2015) High-Efficiency All-Dielectric Metasurfaces for Ultracompact Beam Manipulation in Transmission Mode. *Nano Letters*, **15**, 6261-6266. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b02926>
- [6] Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G. and Zhang, X. (2009) An Optical Cloak Made of Dielectrics. *Nature Materials*, **8**, 568-571. <https://doi.org/10.1038/nmat2461>
- [7] Wen, D., Yue, F., Li, G., *et al.* (2015) Helicity Multiplexed Broadband Metasurface Holograms. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8241. <https://doi.org/10.1038/ncomms9241>
- [8] 赵雪珺, 黄晓春, 王长亮, 等. 宽波段高光谱成像技术在物证检验中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 674-678.
- [9] Chen, W.T., Zhu, A.Y., Sanjeev, V., *et al.* (2018) A Broadband Achromatic Metalens for Focusing and Imaging in the Visible. *Nature Nanotechnology*, **13**, 220-226. <https://doi.org/10.1038/s41565-017-0034-6>
- [10] Badloe, T., Kim, I., Kim, Y., Kim, J. and Rho, J. (2021) Electrically Tunable Bifocal Metalens with Diffraction-Limited Focusing and Imaging at Visible Wavelengths. *Advanced Science*, **8**, Article ID: 2102646. <https://doi.org/10.1002/advs.202102646>
- [11] Chen, X., *et al.* (2012) Dual-Polarity Plasmonic Metalens for Visible Light. *Nature Communications*, **3**, Article No. 1198. <https://doi.org/10.1038/ncomms2207>
- [12] Balthasar Mueller, J.P., Rubin, N.A., Devlin, R.C., *et al.* (2017) Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization. *Physical Review Letters*, **118**, Article ID: 113901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.113901>
- [13] Arbabi, A., Horie, Y., Bagheri, M. and Andrei Faraon (2015) Dielectric Metasurfaces for Complete Control of Phase and Polarization with Subwavelength Spatial Resolution and High Transmission. *Nature Nanotechnology*, **10**, 937-943. <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.186>

-
- [14] Mueller, J.P.B., Rubin, N.A., Devlin, R.C., *et al.* (2017) Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization. *Physical Review Letters*, **118**, Article ID: 113901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.113901>
- [15] Yao, Z. and Chen, Y. (2021) Focusing and Imaging of a Polarization-Controlled Bifocal Metalens. *Optics Express*, **29**, 3904-3914. <https://doi.org/10.1364/OE.412403>
- [16] Liu, W., Hu, B., Huang, Z., *et al.* (2018) Graphene-Enabled Electrically Controlled Terahertz Meta-Lens. *Photonics Research*, **6**, 2327-9125. <https://doi.org/10.1364/PRJ.6.000703>
- [17] Zhou, Y., Yuan, Y., Zeng, T., Wang, X., Tang, D., Fan, F. and Wen, S. (2020) Liquid Crystal Bifocal Lens with Adjustable Intensities through Polarization Controls. *Optics Letters*, **45**, 5716-5719. <https://doi.org/10.1364/OL.405722>
- [18] Qin, S., Huang, H., Jie, K., *et al.* (2021) Active Modulating the Intensity of Bifocal Metalens with Electrically Tunable Barium Titanate (BTO) Nanofins. *Nanomaterials*, **11**, Article 2023. <https://doi.org/10.3390/nano11082023>
- [19] Pu, M., Chen, P.O., Wan, C., *et al.* (2013) Broadband Anomalous Reflection Based on Gradient Low-Q Meta-Surface. *AIP Advances*, **3**, Article ID: 052136. <https://doi.org/10.1063/1.4809548>
- [20] 杨文彬, 张丽, 刘菁伟, 等. 石墨烯复合材料的制备及应用研究进展[J]. 材料工程, 2015, 43(3): 91-97
- [21] Zheng, X., Jia, B., Lin, H., Qiu, L., Li, D. and Gu, M. (2015) Highly Efficient and Ultra-Broadband Graphene Oxide Ultrathin Lenses with Three-Dimensional Subwavelength Focusing. *Nature Communications*, **6**, Article No. 8433. <https://doi.org/10.1038/ncomms9433>