

## 可调谐超构透镜的发展现状

林雨, 蒋春萍

引用本文:

林雨, 蒋春萍. 可调谐超构透镜的发展现状[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 43–61. doi: 10.3788/CO.20201301.0043

LIN Yu, JIANG Chun-ping. Recent progress in tunable metalenses[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 43–61. doi: 10.3788/CO.20201301.0043

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.20201301.0043>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 实用化平面超振荡透镜的研究进展

Research progresses of planar super-oscillatory lenses for practical applications

*中国光学*. 2019, 12(6): 1155 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1155>

### 柔性变焦透镜发展现状

Recent advances in flexible variable-focus lens

*中国光学*. 2015(4): 535 <https://doi.org/10.3788/CO.20150804.0535>

### 表面等离子体平面金属透镜及其应用

Planar plasmonic lenses and their applications

*中国光学*. 2017, 10(2): 149 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0149>

### 变换光学透镜天线研究进展

Research progress of transformation optics lens antenna

*中国光学*. 2017, 10(2): 164 <https://doi.org/10.3788/CO.20172002.0164>

### 太赫兹偏振测量系统及其应用

Polarization sensitive terahertz measurements and applications

*中国光学*. 2017, 10(1): 98 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0098>

# 可调谐超构透镜的发展现状

林雨<sup>1,2,3</sup>, 蒋春萍<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学院纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123;
3. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215123)

**摘要:**随着新兴光学设备对微型化、一体化、智能化光学变焦系统的需求与日俱增,大大促进了纳米光电子学的迅猛发展。超构透镜是由具有特殊电磁属性的人造元素按照一定的排列方式组成的具有透镜功能的二维平面结构,其最大优点就是:轻薄和易于集成。然而,集成在超构透镜上的微纳结构一旦制备完成,便难以再改变其形貌或者尺寸,因而无法对其聚焦性能进行实时调控,限制了其功能及应用范围的进一步扩展。近年来,科学家们探索了实现超构透镜聚焦性能实时调控的多种途径,其中最引人注目的是将智能材料与超构透镜相结合。本文首先回顾了可调谐超构透镜的最新进展,分别详细阐述和分析了它们的调节原理和器件性能。最后,归纳分析了当前阻碍可调谐超构透镜发展的主要问题,并进一步对未来可调谐超构透镜的发展趋势做出了展望。

**关键词:** 纳米光电子学; 可调谐超构透镜; 智能材料; 聚焦性能

**中图分类号:** TN29    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/CO.20201301.0043

## Recent progress in tunable metalenses

LIN Yu<sup>1,2,3</sup>, JIANG Chun-ping<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. *School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*
  2. *Key Lab of Nanodevices and Applications, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;*
  3. *Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China)*
- \* Corresponding author, E-mail: cpjiang2008@sinano.ac.cn*

**Abstract:** Emerging optical devices demand miniaturized, integrated and intelligent optical zoom systems, thus stimulating development in nano-optoelectronics. Metalenses are two-dimensional planar structures with lens function composed of arrays arranged specifically to equally focus wavelengths of light. Due to their ultra-thin and lightweight properties and their ease of integration, it is expected that they will revolutionize optics by replacing the conventional bulky, curved lenses used that pervade optical devices. However, once the micro/nano-structures of a metalens are fabricated, their shape and size cannot be modified, which can not realize the real-time adjustment of focusing and will limit the further development of metalenses' functions and applications. Currently, substantial effort is being devoted to solving this problem. One of the most attractive as-

收稿日期: 2018-11-07; 修订日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61674163)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61674163)

pects of metalenses is in the way they combine metasurface lenses with smart materials. In this article, we first provide an overview of novel tunable metalenses. Then, we elaborate and analyze their regulatory principles and device performance, respectively. Finally, we summarize the current problems and difficulties facing the development of tunable metalenses and describe the direction of their future development.

**Key words:** nano - optoelectronics; tunable metalens; smart materials; focusing performance

## 1 引言

聚焦透镜作为精细庞杂的光学系统中的重要组成部件,在光通信、大功率激光器、生物医疗以及高清晰成像等领域有着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。上述应用中,几乎都需要高速实时动态调节透镜的聚焦性能(焦距、焦点位置、能量),从而使系统具有良好的操控性和适应性。在传统的光学系统中,人们一般会将多个具有不同尺寸和材质的透镜进行堆叠来获得聚焦效果。而对其聚焦性能的调控主要是通过机械齿轮驱动的方式和调整透镜在系统中的位置来实现的。因此,该类系统具有体积笨重、稳定性差、机械磨损严重、加工难度大、变焦的速度较慢、精度不高等一系列的缺点<sup>[2-3]</sup>。随着光学成像设备的微型化,传统的机械变焦系统已无法满足现代光学设备对自动化、智能化、微型化的要求。近年来,超材料和超表面的迅猛发展使新一代变焦系统的出现成为可能。超材料,是一种全新类型的复合材料,由人工设计结构实现,具有天然材料无法比拟的超常物理特性(例如:负磁导率、负介电常数、负折射率等)<sup>[4-8]</sup>。在超材料的基础上,科学家开始进一步研究具有平面光学、薄膜光学和衍射光学潜力的超表面<sup>[9-12]</sup>。超表面是由具有特殊电磁属性的人工原子按照一定的排列方式组成的二维平面结构,可实现对入射光的振幅,相位,偏振等的灵活调控,具有强大的光场操控能力<sup>[13-15]</sup>。与具有三维结构的超材料相比,超表面不但突破了传统材料所具有的电磁属性,其二维平面结构还克服超材料三维结构加工难度大等问题,为纳米光电子器件集成化,微型化提供了便利<sup>[16-17]</sup>。将具有特殊电磁属性的人造元素按照一定的排列方式组成的具有透镜功能的二维平面结构即为超构透镜。

超构透镜最初是由哈佛大学应用物理系教授 Federico Capasso 及其在哈佛大学约翰·保尔森工程和应用科学学院(SEAS)的科研小组开发的。不同于传统透镜,超构透镜最大的优点就是:轻薄(厚度为纳米级)和易于集成化。与传统透镜相比,其性能更加优良,并且完全涵盖了传统光学装备中厚重复杂透镜组才能实现的功能,可使得现有手机摄像头、眼镜、虚拟现实和增强现实硬件都变得非常轻薄<sup>[18-22]</sup>。然而,集成在超表面上的微纳结构一旦通过光刻技术制备完成后,便难以再改变其形貌或者尺寸,也就是说它的功能就此确定,无法再对其进行实时的调控,这对其性能的进一步提高以及应用领域拓展造成了巨大的阻碍。因此,探索多种途径以实现超构透镜聚焦性能的实时调控已成为科学研究的热点问题。

目前,可调谐超构透镜主要包括两大类,一种是基于介电弹性体、石墨烯、相变材料、液晶等一系列智能材料的可调谐超构透镜;另一种是基于微机电、微流体等精密技术的机械可重构超构透镜。这些可调谐超构透镜以其结构紧凑、微型化,控制轻便灵活以及易于集成等诸多优点引起了国内外学者的广泛关注,有望克服传统光学系统所面临的难题。本文综述了改变超构透镜焦距、焦点位置以及聚焦强度的实现方法,分析了超构透镜的主要性能指标,总结了目前可调谐变焦超构透镜的发展所面临的困难和亟待解决的问题,并积极探索未来可调谐变焦超构透镜的发展方向。

## 2 基于智能材料的可调谐超构透镜

### 2.1 电致驱动可调谐超构透镜

随着科学家对电可控智能材料的不断探索,一系列电致驱动可调谐超构透镜纷纷涌现出来。2017年,南京大学冯一军教授团队与新加坡国立

大学仇成伟教授及美国德克萨斯大学 Andrea Alù 教授合作,将有源元素-微波变容管集成到电磁超表面单元结构中,制备了一种工作在微波频段(6.9GHz)的可电调谐的有源惠更斯超构透镜,该透镜展现出了对入射电磁波进行实时动态聚焦的强大功能<sup>[23]</sup>。如图1所示,通过计算机程序管理的多通道直流偏置电压控制系统,可以实时调控微波变容管的电容,从而调节其片状阻抗,就可以改变单元结构与入射电磁波的共振特性,使得所设计的超构元素可以覆盖近似360°的可用相位。

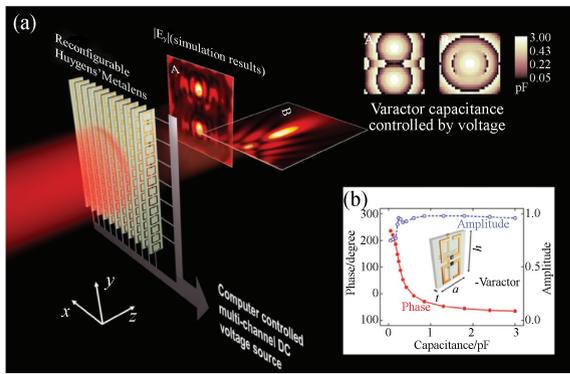


图1 (a)可调谐超透镜实现电磁波的动力学聚焦和多点聚焦切换示意图;(b)极化电磁波相位和幅度随电容变化曲线<sup>[23]</sup>

Fig. 1 (a) Schematic diagram of dynamic focusing and multi-point focus switching of electromagnetic waves by reconfigurable metalens; (b) capacitance-dependent phase and amplitude responses of polarized electromagnetic waves, respectively<sup>[23]</sup>

通过预先设定的程序对每个有源惠更斯超构元素单元加载相应的偏置电压以对其电磁响应进行独立、连续的控制,人们便可以灵活及时地对入射的电磁波按照预先设想的波前形式加以重新构造,从而可以成功取得崭新的光束汇聚功能。通过该实验,他们成功获得了诸如使微波信号在任意焦点位置聚焦、任意多焦点聚焦及动态焦点的快速扫描等功能。

同年,来自北京理工大学的胡斌教授将石墨烯与超构透镜相结合,设计了一种焦距可调的超构透镜<sup>[24]</sup>。由于石墨烯的光学性质在太赫兹波

段变化较大,非常适用于太赫兹可调谐器件的设计与制备<sup>[25]</sup>。

石墨烯介电常数  $\epsilon_g$  取决于其电导率  $\sigma_g$ :

$$\epsilon_g = 1 + \frac{i\sigma_g}{\omega\epsilon_0 t_g}, \quad (1)$$

其中,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\omega$  为入射光的角频率,假设石墨烯的厚度  $t_g = 0.3$  nm。其电导率  $\sigma_g$  是带间电导率  $\sigma_{\text{inter}}$  和带内电导率  $\sigma_{\text{intra}}$  的总和,在太赫兹频率内,因为  $\hbar\omega < 2E_F$ ,故可以通过泡利不相容原理忽略带间跃迁,因此,石墨烯的电导率为:

$$\sigma_g \approx \sigma_{\text{intra}} =$$

$$i \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\Gamma)} \left[ \frac{E_F}{k_B T} + 2 \ln \left( e^{\frac{E_F}{k_B T}} + 1 \right) \right], \quad (2)$$

其中  $e$  为电子电荷,  $\hbar$  为约化普朗克常数,  $\Gamma$  为散射率,  $\Gamma = eV_f^2/2\mu E_F$ ,  $E_F$  为石墨烯的费米能级,其与电偏置状态有关;  $v_f$  为费米速度,  $\mu$  为载流子迁移率,  $T$  为温度,而  $k_B$  为玻尔兹曼常数。参考 CVD 石墨烯样品的实验结果,取  $v_f = 10^6$  m/s,温度  $T$  设为 300K,载流子迁移率  $\mu = 1$  m<sup>2</sup>v<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>。由式(2)可知,石墨烯的电导率取决于它的费米能级  $E_F$ ,通过均匀调整施加在石墨烯层上的栅极电压,可以调节石墨烯内部载流子的分布,从而改变石墨烯的费米能级。石墨烯的费米能级  $E_F$  和偏置电压  $V_g$  之间存在如下近似关系式:

$$E_F \approx \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0 V_g}{e t_s}}, \quad (3)$$

其中,  $\epsilon_r$  为栅极介质的相对介电常数,  $V_g$  表示偏置电压,  $t_s$  为二氧化硅绝缘层厚度。通过加载不同的偏置电压,可以自由调控石墨烯的费米能级。由此便建立了偏置电压  $V_g$  与石墨烯介电常数之间的关系<sup>[24,26]</sup>。

如图2(a)所示,所设计的变焦超构透镜由单层石墨烯、蚀刻有不同长度和旋转角度的矩形孔的金属超构透镜、硅基底、石英底栅以及顶部和底部电极组成。由式(2)~式(4)可知,通过对石英底栅加载电压可以均匀调控石墨烯的介电常数。如图2(b)所示,随着  $E_F$  增加,  $\epsilon_g$  减少。当石墨烯位于天线孔径中时,天线的谐振频率将有小的( $\Delta\omega$ )偏移,大小取决于石墨烯的介电常数,并且可以通过下式计算得出:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{\iiint \Delta\varepsilon |E|^2 dr^3}{2\iiint \varepsilon |E|^2 dr^3}, \quad (4)$$

其中  $\Delta\varepsilon$  是石墨烯介电常数的变化。随着  $E_f$  的增加,由图 2(b)可发现  $\Delta\varepsilon < 0$ ,因此通过式(4)获得的  $\Delta\omega$  为正。因而,能够使共振频率发生蓝移。

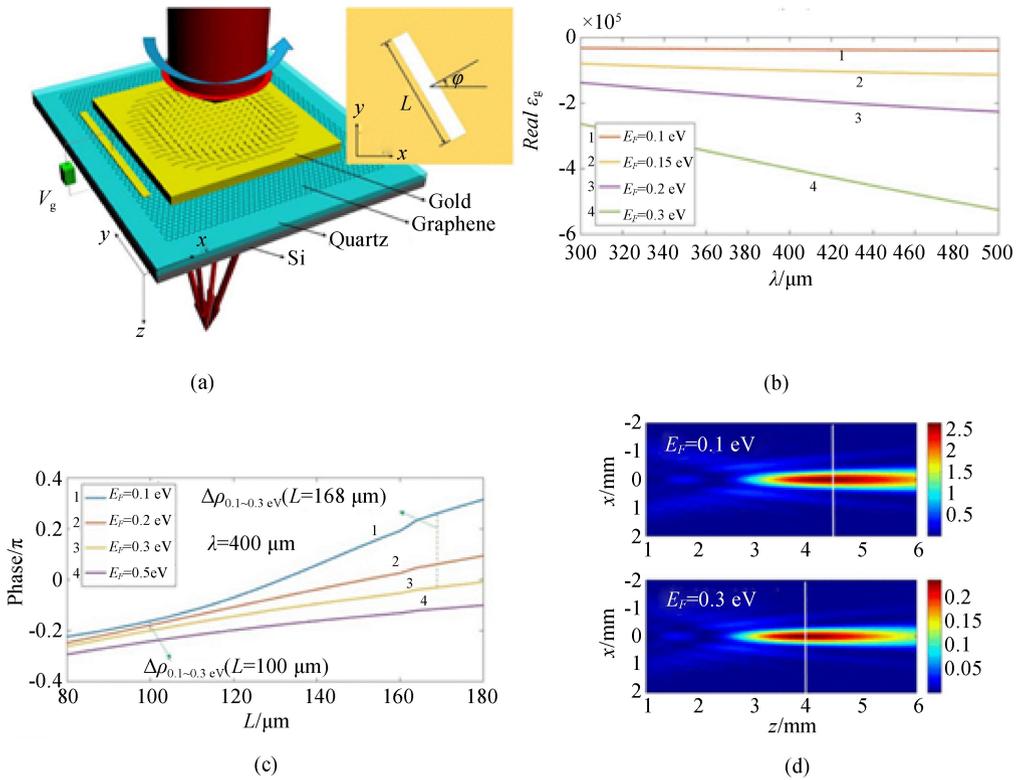


图 2 (a) 太赫兹可调谐超构透镜示意图; (b) 太赫兹频率中石墨烯介电常数的实部随费米能级  $E_f$  的变化曲线。矩形孔长度和旋转角度分别为  $L = 160 \mu\text{m}$  和  $\varphi = 0$ ; (c) 右旋圆偏振波通过具有不同费米能级  $E_f$  的矩形孔单元时,透射波相位随矩形孔长度  $L$  变化曲线; (d) 当费米能级  $E_f$  从 0.1 eV 增加到 0.3 eV 时,经过所设计的超构透镜的透射右旋圆偏振太赫兹波的电场强度分布<sup>[24]</sup>

Fig. 2 (a) Schematic of the THz reconfigurable metalens; (b) real part of the graphene permittivity in THz frequency as a function of  $E_f$ . The aperture length and rotation angle are  $L = 160 \mu\text{m}$ ,  $\varphi = 0$ ; (c) phase of RCP scattering THz wave through one rectangular aperture versus different aperture lengths  $L$  for different  $E_f$ ; (d) electric field intensity distributions of the transmitted RCP THz wave at different  $E_f$ <sup>[24]</sup>

通过观察图 2(c)发现,通过降低石墨烯的费米能级可以使透射波长为  $400 \mu\text{m}$  的右旋圆偏振 THz 波的相位增加。如图 2(c)所示,当石墨烯费米能级  $E_f$  增加时,透射的右旋圆偏振太赫兹波的振幅和相位都减小。其电场强度分布如图 2(d)所示,可见当波长为  $400 \mu\text{m}$  的右旋圆偏振太赫兹波垂直入射至该可调谐超构透镜时,随着石墨烯的费米能级从 0.1 eV 变化到 0.3 eV,所聚焦的

焦距连续变化至  $1.25\lambda$ 。

此外,韩国科学家与来自伯明翰大学的研究人员通力合作,成功研发出了聚焦强度可调谐的太赫兹超构透镜。此透镜的整体厚度小于  $25 \mu\text{m}$ ,比一张信用卡还要薄,可用于微小型精密光学设备中<sup>[26]</sup>。

该可调谐变焦超构透镜由金薄膜制成,如图 3(a)所示,其上带有一个微米尺寸的 U 形孔并覆

盖着石墨烯,通过旋转 U 形孔可获得  $360^\circ$  的相位变化。将 U 形孔按预先设计好的相位分布进行排列,便能获得聚焦超构透镜,光束聚集在一个小区域内(红点),利用离子凝胶作为顶栅可对石墨烯的光学性质进行实时的电调控。进而控制聚焦透镜的聚焦强度。调制效果如图 3(b)(彩图见期刊电子版)所示,当将栅极电压由石墨烯具有最

高电阻的电荷中性点(CNP) ( $V_{\text{CNP}} = 2.2 \text{ V}$ )降低到石墨烯中最高掺杂水平 ( $V_{\text{MAX}} = 0.0 \text{ V}$ ) 的位置时,由于栅极电压引起的石墨烯载流子密度的增加导致太赫兹波通过带内跃迁的吸收变强,因此使传输效率  $T_{\text{RL}}$  大大降低,从而实现了实时电调控,透射聚焦光的光强得到了显著削减。

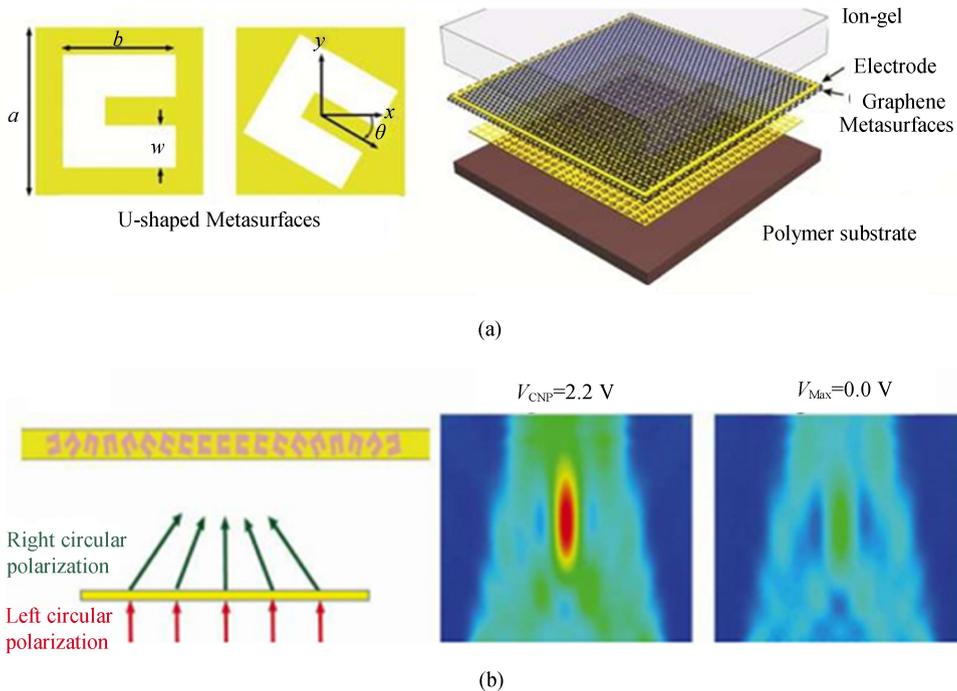


图 3 (a) 基于石墨烯的可调谐超构透镜结构示意图; (b) 调控原理示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 3 (a) Schematic diagram of graphene based reconfigurable metalens; (b) schematic diagram of regulation principle<sup>[24]</sup>

2018 年,来自美国哈佛大学的科研人员将超构透镜与一类被称为介电弹性体致动器(DEA)的电话性聚合物相集成,开发出一种工作在近红外(1 550 nm)波段的大面积自适应超构透镜<sup>[27]</sup>。从本质上说,它可被看作是一类电控平面的人造眼睛。超构透镜位于预拉伸弹性电介质板的中心,由塑料框架悬挂,如图 4(a)所示。使用银浆和碳带(黑色条纹)将电触点制成 8 个单壁碳纳米管(SWCNTs)电极,标记为  $V_{1,5}$  和 GND(接地)。图 4(b)为可调谐超构透镜调制原理示意图。当超表面处于初始态时,超构透镜周期性的径向梯

度纳米结构对应于  $0$  到  $2\pi$  的相位调制,排列成类似于菲涅耳透镜的阵列环。能够将垂直入射的光束汇聚到与焦距相对应的距离处。当施加电压时,施加的电压为电极层提供电荷。此时,它们的静电吸引力将能够在电场方向(厚度方向)上压缩弹性电介质。由于弹性体在变形时保持体积不变,从而使其被横向拉伸。通过对介电弹性体不同位置施加驱动电压,此类自适应超构透镜能够在同一时刻形成模糊图像,需具备的 3 个关键条件为焦距、散光、像移。

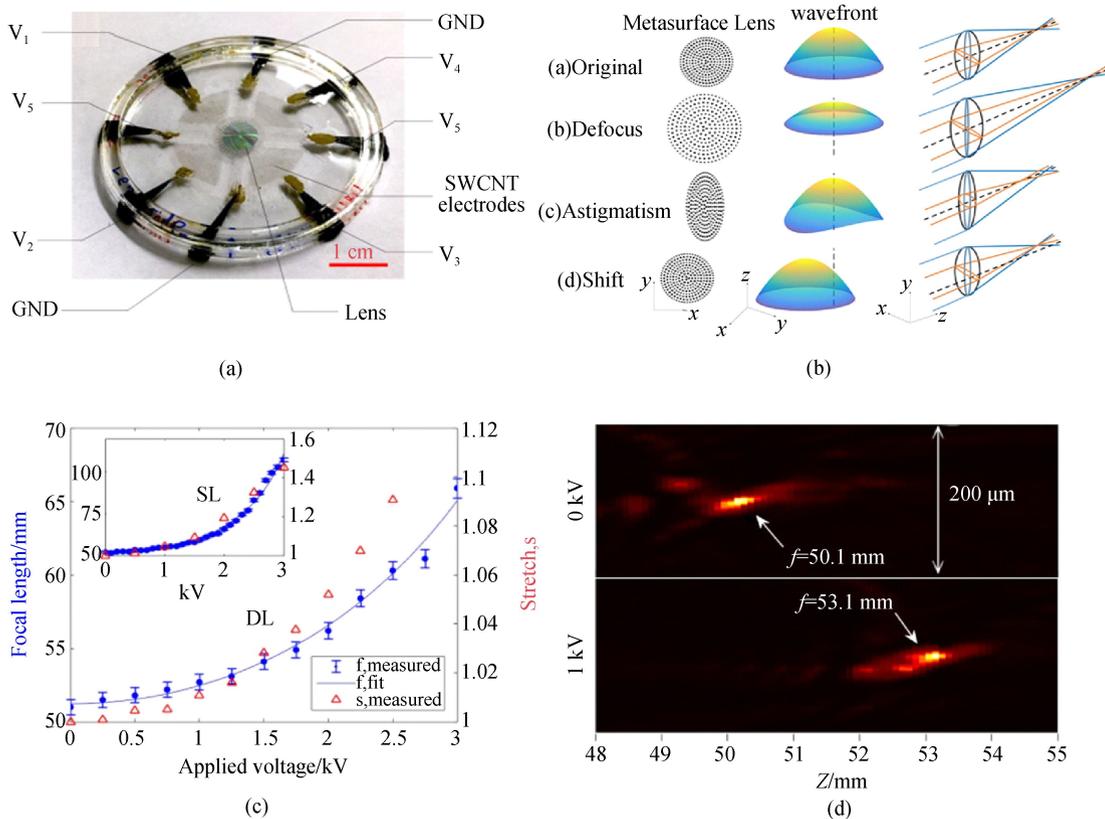


图 4 基于介电弹性体的可调谐超构透镜的 (a)实物图;(b)原理图;(c)对中心电极 V5 加电时,焦距的调谐能力;(d)两个不同的电压下扫描聚焦强度分布图<sup>[27]</sup>

Fig. 4 (a) Physical photo and (b) principle of dielectric elastomer actuator based tunable metalens; (c) tuning ability of focal length when power is applied to the center electrode V<sub>5</sub>; (d) Z-scan of the focus intensity profile was scanned at two different voltages<sup>[27]</sup>.

由介电弹性体致动器 (Dielectric Elastomer Actuators, DEA) 提供的焦距与电压的关系如下:

$$\frac{f}{f_0} = \frac{1}{1 - (\varepsilon/Y)(V/t)^2}, \quad (5)$$

其中,  $V$  代表输入电压;  $\varepsilon$  代表介电常数;  $Y$  代表杨氏模量;  $t$  代表介质层的厚度。

如图 4(c) 所示, 实验结果表明, 在中心电极 V<sub>5</sub> 的电压从 0 增加到 3 kV 的过程中, 透镜的焦距随施加电压由约 50 mm 增加至约 65 mm, 焦距调整程度为 30% ( $\Delta f/f_0$ )。使用显微镜物镜 (10 倍放大率) 在两个不同的电压下对聚焦强度分布进行扫描, 从图 4(d) 中可以看出, 当未加电压时, 焦距约为 50.1 mm, 加载 1 kV 电压时, 焦距变为 53.1 mm。

在可以预见的未来, 该类自适应超构透镜能够很容易地被集成到诸如超薄智能手机摄像镜头、超轻探测器以及微型显微镜等成像系统中。只需控制单个超表面, 便可实现轻薄平面自主调

焦、同步校准光学像差和稳定清晰成像的能力。

同年, 美国科学家 Hossein Mosallaei 等人将硅基纳米天线阵列与多层氧化锡-氧化铝复合材料相结合, 设计了一种工作在近红外 (1300 nm) 波段的能够实时在轴聚焦与离轴聚焦模式之间切换的可调谐超构透镜, 如图 5 (彩图见期刊电子版) 所示<sup>[28]</sup>。由图 5(a) 可见, 可调谐超构单元由金属背底 (底电极) 以及集成在硅基纳米盘中的级联 ITO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组合而成, 在外部多栅偏压的影响下, 利用金属-ITO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-半导体复合超构元素中 ITO 有源层中载流子浓度的菲尔德效应, 可以在每个 ITO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对的界面处形成约 1 nm 厚的均匀累积层, 从而改变非均匀有源层的介电常数。而介电常数的改变会使该介质与入射电磁波之间的相互作用发生改变, 从而使其共振形式发生转变。

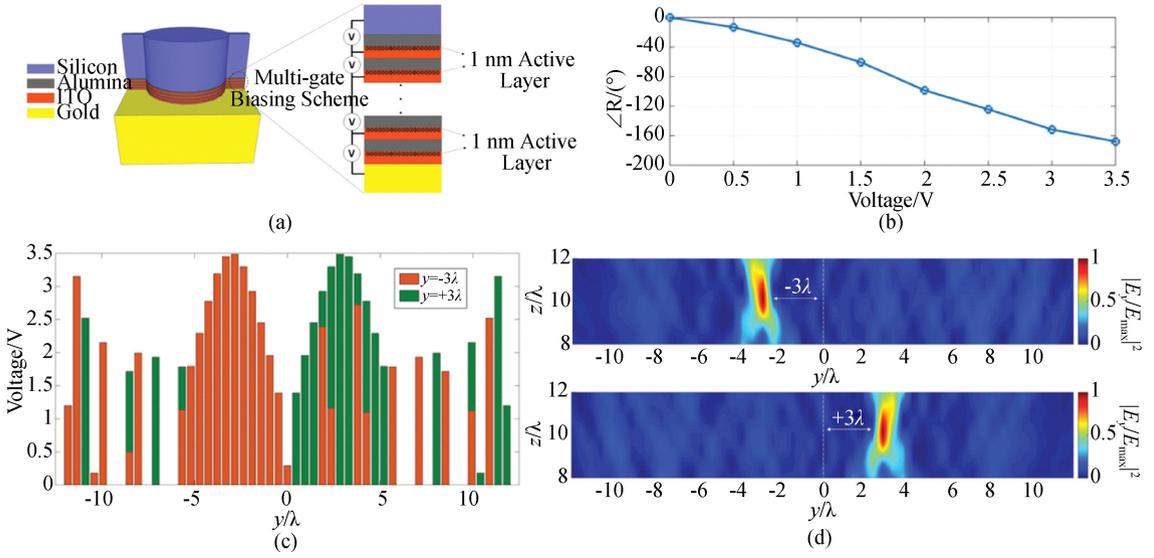


图 5 (a)多栅极偏置技术示意图; (b)在工作频率  $f_m = 218.5$  THz 下,施加不同偏压时的反射相位变化曲线; (c) 使焦点偏离  $y$  轴  $\pm 3\lambda$  时所需的偏压分布; (d) 离轴聚焦时归一化电场强度分布图<sup>[28]</sup>

Fig. 5 (a)The schematic overview of multigate biasing technique; (b)the reflection phase varies with different applied biases at the operating frequency of  $f_m = 218.5$  THz; (c) the required biasing distributions when focal point deviating away from  $y$ -axis with amount of  $\pm 3\lambda$ ; (d) the square normalized amplitude of the electric fields for off-axis focusing<sup>[28]</sup>

由图 2(b) 可知,通过对任一超构元素精确施加不同的偏置电压,可以控制 ITO 载流子的浓度,进而可以对纳米天线的梯度相变进行控制,最终得以实时灵活地重构出反射光束的波前相位,以调控器件的聚焦性能。依据相等光学长度原理设计可调谐超构透镜,在超构透镜界面处所需的相位分布与所需的聚焦特性之间的关系可以描述为:

$$\psi(y) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{f_{\text{focal}}^2 + (y - y_0)^2} - f_{\text{focal}}), \quad (6)$$

其中,  $y_0$  与相对于聚焦光轴的横向偏移量有关。图 5(c) 中展示了当焦点沿  $y$  轴偏离  $\pm 3\lambda$  时,所需要的偏置电压的分布方式。按照图 5(c) 中所示的电压分布对器件加载偏置电压,对超构单元的相位分布进行实时调控,离轴聚焦的归一化电场强度分布图如图 5(d) 所示,聚焦中心点将会随即沿  $y$  轴产生偏离,能够获得的最大轴外偏移量是  $y = \pm 3\lambda$ 。

## 2.2 光致驱动可调谐超构透镜

典型的光致驱动方式是利用相变材料 ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , GST) 来直接构建可调谐光学器件。这是一种在光学频率下对超构元素进行独立及可逆控制的智能实用方法。通过利用光-热效应,使激光

对相变材料进行点对点加热, GST 便能在极短的时间内从非晶体状态变成不同程度的结晶状态,使得其在可见光和红外波段有较大的折射率变化(折射率变化范围大约在 4.4 到 7.2 之间)。由于存在相位延迟,故能通过逐个像素的激光加热来写入、擦除和重写超构元素来达到改变超构透镜焦距的目的<sup>[29-31]</sup>。数值仿真结果表明,在尝试设计可变焦平面透镜的过程中,将 GST 填充进纳米狭缝阵列超构透镜的狭缝中后,通过改变 GST 的折射率,能够得到出人意料的良好变焦效果<sup>[32]</sup>。但当使用高能量的激光对 GST 进行改性时,高温会使金属薄膜产生不可逆的膨胀,此时透镜结构的整体参数也就发生了细微变化,而超构透镜偏偏对这种细微的参数变化又十分敏感,大大降低了超构透镜的聚焦效果以及可重构性。因此,2016 年,英国科学家 Nikolay I. Zheludev 等人提出了一种完全由 GST 组成的可调谐超构透镜,如图 6 所示<sup>[33]</sup>。通过空间光调制器和电光脉冲选择器将飞秒脉冲激光聚焦并定位在薄膜表面的各个位置。通过光学激发使薄膜从非晶态到结晶态连续转换来改变薄膜的复折射率,从而在硫化物玻璃相变薄膜中高精度地写入各种类型的超构透镜。

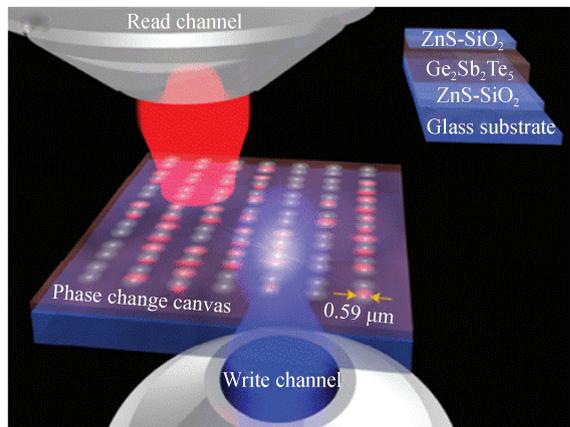


图 6 在相变薄膜中写入可重构光子器件(艺术效果)<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Reconfigurable photonic devices written in a phase-change film (artistic impression)<sup>[33]</sup>

研究人员利用该方法构筑了工作在可见光范围的非涅耳波带片,如图 7(a)所示,其具有  $66\ \mu\text{m}$  的直径和  $50\ \mu\text{m}$  的焦距。当波长为  $\lambda = 730\ \text{nm}$  的激光束正常照射该非涅耳波带片时,其实验结果如图 7(b)所示。可见,该器件能够产生清晰的焦斑,焦斑尺寸  $r = 0.75 \pm 0.05\ \mu\text{m}$ 。该透镜结构可以通过使用不同照明条件的相同激光器进行“擦除”。与此同时,研究人员还利用上述方法“重写入”了一种超振荡二元透镜,如图 7(c)所示,该透镜由 21 个不规则宽度和直径的同心环组成,整体尺寸为  $68\ \mu\text{m}$ 。当波长为  $\lambda = 730\ \text{nm}$  的激光束正常照射该超振荡透镜时,其实验结果如图 7(d)所示,在距离掩模  $43.8\ \mu\text{m}$  处产生  $r = 0.49 \pm 0.05\ \mu\text{m}$  的中心焦点。上述由二元图案

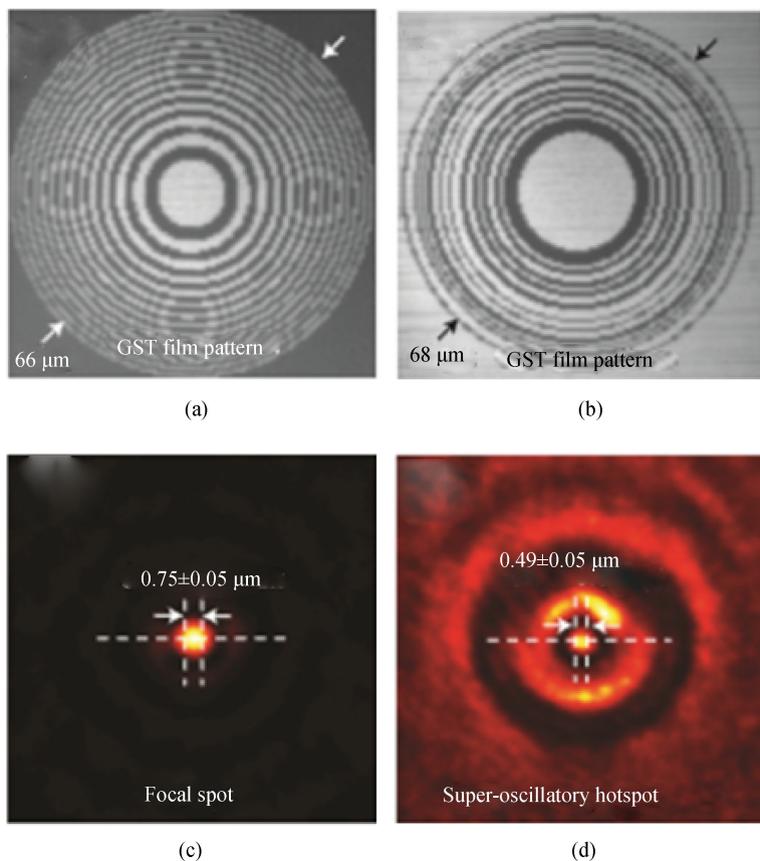


图 7 (a)非涅耳波带片图像;(b)二元超振荡透镜图案;由非涅耳波带聚焦的(c)和由二元超振荡透镜聚焦的(d)光学热点的显微镜图像<sup>[33]</sup>

Fig. 7 (a) Fresnel zone-plate pattern. (b) Binary super-oscillatory lens pattern. Microscope image of optical hotspot focused by (c) the fresnel zone-plate and (d) the binary super-oscillatory lens<sup>[33]</sup>

(环)形成的菲涅耳透镜和超振荡透镜使用了无定形相和结晶相这两个 GST 膜的结构相。综上所述,相变材料(GST)是一种可用于创建动态可重构聚焦超构透镜的新型智能材料。利用该材料制备的可调谐超构透镜具有可操控性强、成本低、可大面积制备,易于工程应用等优点。

### 2.3 热致驱动可调谐超构透镜

构成热致驱动超构透镜的典型材料为液晶。液晶是性质介于液体和晶体之间的中间状态,具有液体的流动性和晶体的各向异性,且其内部组织的排列方式对温度较为敏感,利用环境温度的改变能够影响液晶材料的折射率以及极化方向。

2016年,哈尔滨工业大学的钟建文等人将液晶材料与超表面相结合,利用 COMSOL Multiphysics 软件设计并仿真了一种工作在近红外频率范围内的可调焦超构透镜,如图 8(a)所示<sup>[34]</sup>。通过改变硅纳米块的长度、宽度和取向可以产生覆盖 0 到  $2\pi$  的反射相位,按照图 8(b)所示阵列化

分布,可使反射光在宽波长(1 200 ~ 1 700 nm)范围内高效聚焦。与此同时,如图 8(c)所示,可将厚度约为 50 nm 的液晶层涂覆在超构透镜的顶部并嵌入超表面结构当中。液晶分子在室温下处于向列相,当温度升高至超过 35°C 时,液晶分子的取向变为随机分布。对于同一束入射光而言,这两种状态的液晶所具有的折射率是不同的,即其介电常数是不同的。众所周知,当微纳米结构周围介电环境发生变化时,其共振模式将被改变从而影响到射电磁波的相位和振幅。这样,通过对超表面和液晶材料的精心设计与结合,便可以调控超构透镜的波前,从而达到改变焦距的目的。如图 8(d)~8(e)所示,当外部环境温度改变时,入射和散射光的有效折射率会发生改变,使得焦距逐步减小。当温度高于 35°C 时,液晶分子产生相变,平面透镜的焦距就会由 7.40  $\mu\text{m}$  急剧变为 6.75  $\mu\text{m}$ 。对于中心波长,焦距减少量共约为 9.7%,此时的聚焦效率为 19.5%。

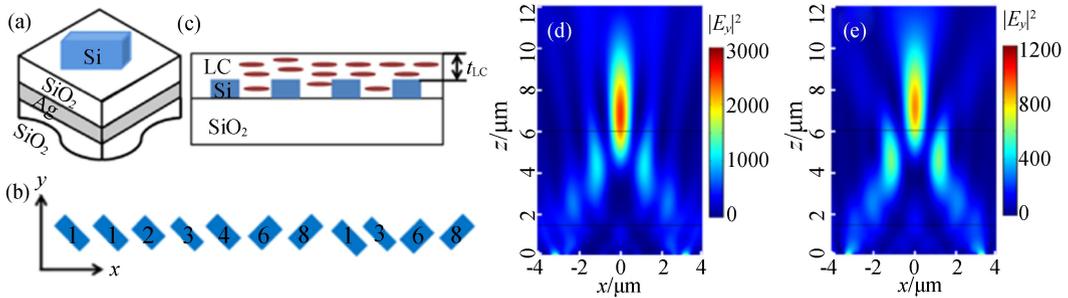


图 8 (a) 硅纳米天线单元结构示意图;(b) 构成超构透镜的天线排布方式;(c) 液晶-超表面混合结构侧视图;(d) 常温及(e) 35°下,超构透镜聚焦点区域的强度分布<sup>[34]</sup>

Fig. 8 (a) Schematic of silicon nanoantennas unit cell; (b) antennas arrangement of flat cylindrical lens; (c) side view of liquid crystal-metasurface hybrid structure. The intensity distributions in the focal region for the metalens at room temperature (d) and 35° (e)<sup>[34]</sup>

综上所述,将超构透镜与热致驱动智能材料相结合,设计和制备出的可调谐变焦超构透镜具有亚波长厚度、接近衍射极限的焦斑、高透射效率、实时连续可重构性、可操控性强和快速响应等优点,有望在实时、快速和复杂电磁波调控上得到更好的发挥,并为实时可切换全息成像、波束整形及扫描、可调天线辐射等方面的应用奠定坚实的基础。

## 3 机械可重构超构透镜

### 3.1 基于微机电系统的可调谐超构透镜

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS),是一种特征尺度在微米乃至纳米量级的,具有高度集成化的自主模式的智能化机械体系<sup>[35-36]</sup>。而超构透镜具有微型化、易于集成等优点,其制备工艺与芯片加工技术相兼

容。近年来,研究人员们正不断地将这两种前沿技术相结合,以期获得性能良好的可调谐超构透镜。2018年,美国能源部与哈佛大学的科学家们通力协作,成功地将平面超构透镜作为构建模块集成到微机电系统中,获得了焦点位置可调谐的反射式超构透镜<sup>[37]</sup>。如图9(a)所示,研究人员将具有不同直径的纳米柱按预先设计好的空间分布进行阵列化,便可获得等离子体超构透镜。该透镜能够以5 mm的焦距将斜入射( $\theta = 45^\circ$ )的单色中红外光(波长约为 $4.6 \mu\text{m}$ )反射聚焦到与超表面相垂直的空间平面上。接着,利用微型机械手臂将超构透镜转移到MEMS扫描器平台上并与MEMS的中央平台精确对准、胶合,得到MEMS-超构透镜集成系统(图9(b))。通过使用静电驱动模式,该

MEMS平台能够沿两个正交轴方向对超构透镜的运动角度进行实时操控,从而使平面透镜能够在沿每个方位约 $9^\circ$ 范围内实施焦点动态扫描。如图9(c)所示,为了与反射信号的峰值对齐,探测器的位置分别为 $0^\circ$ 、 $2.7^\circ$ 和 $7.3^\circ$ 。当MEMS扫描器被驱动时,能够分别将镜头移动 $0^\circ$ 、 $1^\circ$ 和 $2.5^\circ$ ,从图9(c)下方的反射光束焦线处的光学轮廓图可以看出,对于低角度位移,集成MEMS上透镜系统(lens-on-MEMS system)并不影响MEMS执行器的机械性能,尽管中心峰的不对称性随着平台的倾斜而变化,但高斯拟合结果显示聚焦束分布和半高全宽(FWHM)得到了很好的保持。该装置可用于补偿离轴入射光,从而校正诸如彗差之类的像差。

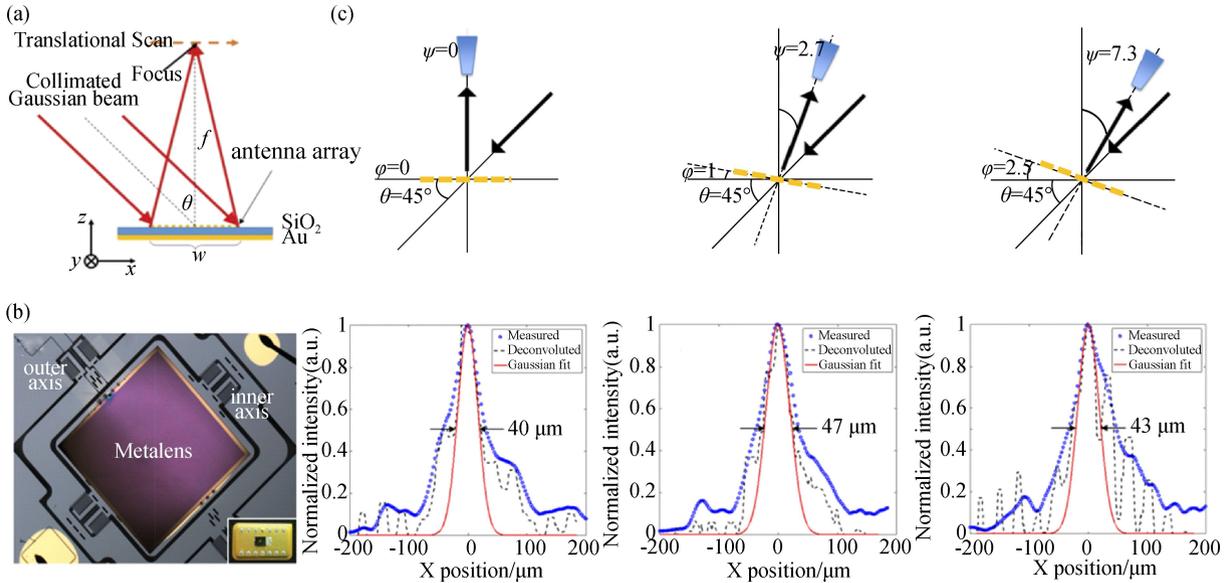


图9 (a) 反射型超构透镜聚焦特性示意图; (b) 集成化可调谐超构透镜实物图; (c) 3种实验配置的示意图(上), 反射光束焦线处的光学轮廓(下)<sup>[37]</sup>

Fig. 9 (a) Schematic of focusing characteristics of reflective metalens; (b) photograph of the integrated tunable metalens; (c) schematic of the three experimental configurations (top), experimentally measured optical profiles at focal lines for the three configurations (down)<sup>[37]</sup>

随后,美国科学家 Ehsan Arbabi 等人设计并制备了基于微机电系统的工作在近红外(915 nm)波段的可调谐超构双合透镜<sup>[38]</sup>。

如图10(a)所示,该系统由固定的玻璃基底上的超表面和可移动的置于氮化硅薄膜上的超表

面组成。电容器极板如图10(a)所示。两个串联电容器作为静电驱动触点。每个电容器在玻璃基板上具有一个板,在膜上具有另一个板,从而在膜和玻璃基板之间产生吸引力。通过静电致动使氮化硅膜层前后移动以改变两个超表面之间的距

离。如图 10(c) 所示,实验结果表明超表面之间距离的微小变化 ( $\Delta x \sim 1 \mu\text{m}$ ) 将导致极大的焦距调整 ( $\Delta f \sim 36 \mu\text{m}$ )。扫描频率可达到几千赫兹。该可调双合超构透镜的绝对聚焦效率可达 40%。它们还可以与第三个表面集成,以制作具有大的视野校正功能 ( $\sim 500 \mu\text{m}$  或  $40^\circ$ ) 的紧凑型显微镜 ( $\sim 1 \text{ mm}$  厚) 和用于 3D 成像的快速轴向扫描。

同年,美国科学家 Arka Majumdar 等人利用由 PECVD 生长的氮化硅介质材料,通过高通量

步进光刻技术构建了一个工作在通信 (1 550 nm) 波段及可见光 (633 nm) 波段的大面积全介质变焦超构透镜系统<sup>[39]</sup>。其灵感来自 Alvarez 透镜, Louis Alvarez 在 1967 年第一次描述了带有可变光能的透镜,可变光能是通过光学元件沿着垂直光轴方向的运动来实现的。这种可变光能透镜包括两个可沿着垂直光轴方向相对运动的光学元件,这两个光学元件的结合可形成一个在光学元件的不同相对位置具有不同光能的透镜。

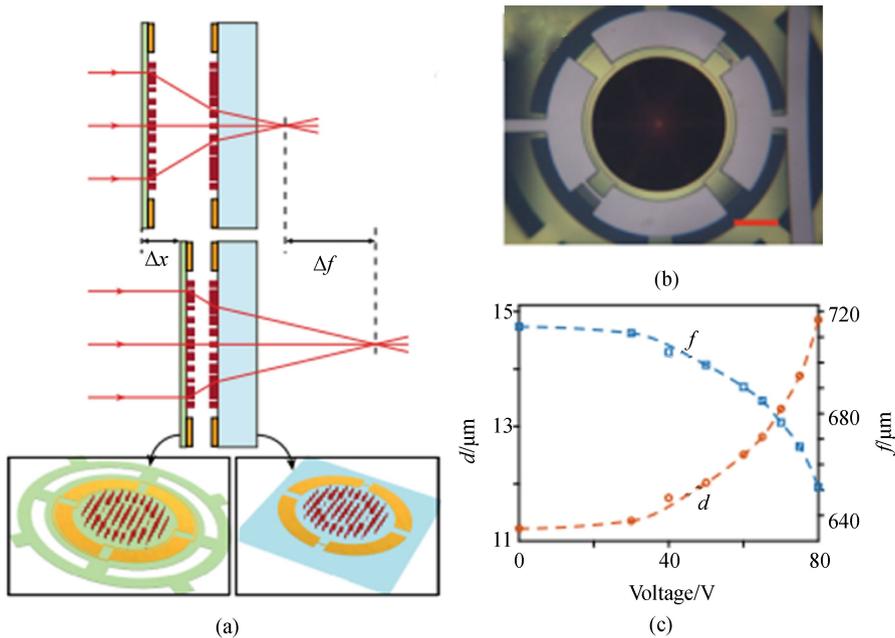


图 10 (a)可调焦超构透镜结构示意图;(b) 最终设备的显微镜图像;(c) 实验测量得到的前焦距  $d$  和两个超构透镜之间距离  $f$  随施加的直流电压变化曲线<sup>[38]</sup>

Fig. 10 (a) Schematic illustration of the proposed tunable metalens; (b) microscope image captured by device; (c) measured front focal length  $d$  and the separation values between the moving and stationary lenses vary with the applied DC voltage<sup>[38]</sup>

如图 11(a), (b) 所示, Arka Majumdar 等人结合两个由氮化硅纳米柱阵列构成的大面积可独立横向致动的立方超表面相位板; 其中一块常规超表面相位板中的纳米结构的相位分布遵循三次多项式函数, 另一块反向相位板遵循相同的函数但具有相反的符号, 常规和反向表面的相位轮廓是:

$$\varphi_{\text{reg}}(x, y) = -\varphi_{\text{inv}}(x, y) = A\left(\frac{1}{3}x^3 + xy^2\right). \quad (7)$$

由此当两块沿光轴对准并且彼此平行定位的相位板相对于彼此横向致动时, 两块相位板共同组成可调焦距透镜, 其在入射波前施加的总相位分布是可以改变焦点的二次函数, 由此可以快速且非线性地调节焦距。通过在相反方向上平移这些相位掩模, 可获得如下的二次形式 ( $d$  为移动距离):

$$\varphi_{\text{Alvarez}}(x, y) = 2Ad(x^2 + y^2) + \frac{2}{3}d^3. \quad (8)$$

焦距是位移的函数:

$$f(d) = \frac{\pi}{2\lambda Ad}. \quad (9)$$

实验测量结果如图 11(c) 和 11(d) 所示, 在 1550 nm 波段通过改变位移  $d$  (1 ~ 4 mm), 可以将焦距由 15 cm 降至 3.57 cm, 效率约为 57%; 于

633 nm 波长处, 通过改变位移  $d$  (1 ~ 4 mm), 可以将焦距由 31 cm 降至 8 cm, 效率约为 17%。该系统凭借所具有的宽光圈 (~1 cm), 实现了 4 倍变焦能力, 并且不需要在光路中增加任何的附加元件 (例如物镜或镜筒透镜)。

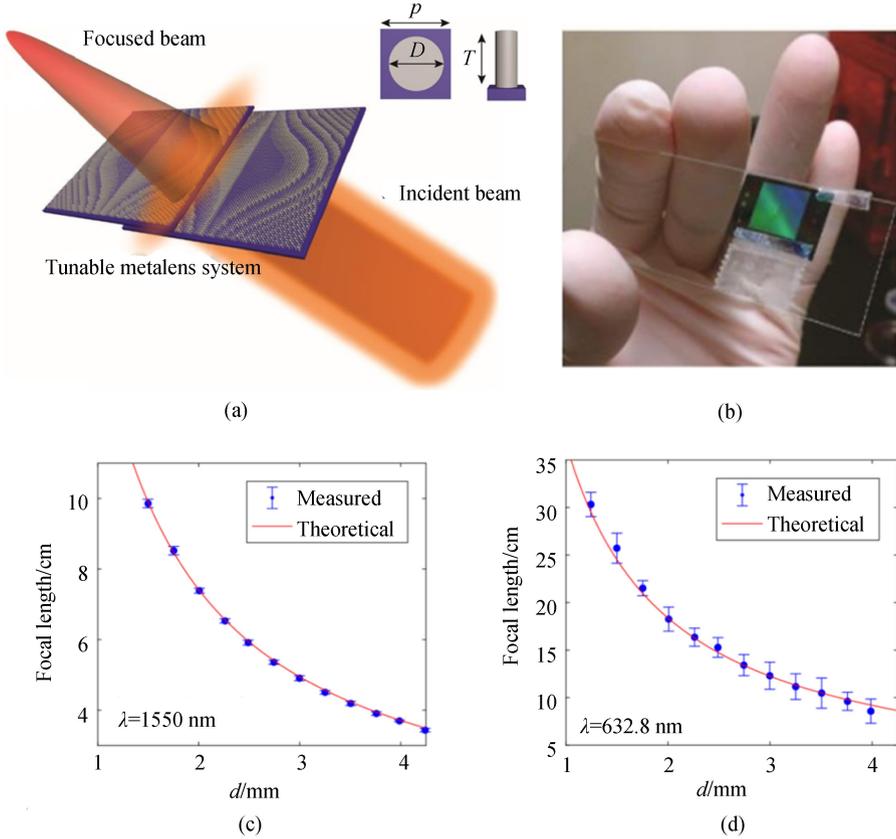


图 11 (a) 可调谐超构透镜系统示意图; (b) 经过完整蚀刻工艺和切割后的超表面立方相位板; (c) 可调谐超构透镜在红外和 (d) 可见光波段的焦距随超表面相位板的横向位移的变化曲线<sup>[39]</sup>

Fig. 11 (a) Schematic representation of tunable metalens system; (b) a fully etched and cleaved metasurface cubic phase plate; focal length as a function of lateral displacement for the infrared (c) and visible (d) for tunable metalens<sup>[39]</sup>

### 3.2 基于柔性可拉伸材料的可调谐超构透镜

近年来, 柔性智能变焦超构透镜已经获得了国内外专家学者的普遍关注, 柔性变焦超构透镜通常由透明弹性薄膜或可拉伸聚合物等材料与超表面相互融合而成。2016 年, 美国科学家 Ho-Seok Ee 和 Ritesh Agarwal 将具有聚焦功能的金纳米块阵列嵌在 PDMS 软膜当中, 制备了工作在可见光范围 (632.8 nm) 柔性可拉伸的变焦超构透镜<sup>[40]</sup>。构成聚焦焦距为  $f$  的处于原始状态的超

构透镜所需的相位分布由式 (10) 式获得,

$$\varphi(x, y) = 2m\pi + \frac{2\pi(f - \sqrt{f^2 + x^2 + y^2})}{\lambda}, \quad (10)$$

其中,  $m$  为任意整数;  $f$  为焦距;  $\lambda$  为入射平面波波长;  $(x, y)$  为对应二维平面内的坐标。

而对于数值孔径 (NA) 较小的超构透镜而言, 分布函数可以近似为:

$$\varphi(r) = \pi r^2 / (2\lambda f). \quad (11)$$

其中: $r^2 = x^2 + y^2$ 。通过拉伸 PDMS 基板,可以改变构成超构透镜的金纳米棒阵列的晶格常数(间隔),此时的相位分布函数变为:

$$\varphi'(r) = \varphi(r/s) = \pi r^2 / (2\lambda f') \quad (12)$$

其中: $f' = s^2 f$ ,这样便可以连续调谐波前,实现调

焦功能。集成有超构透镜的 PDMS 薄膜被安装在具有 4 个可伸缩机械臂的平移台上,如图 12(a)所示,柔性超构透镜的 4 个顶角被微型机械臂夹住,利用机械臂通过机械拉伸的方式便可对透射式超构透镜的聚焦功能进行调控。

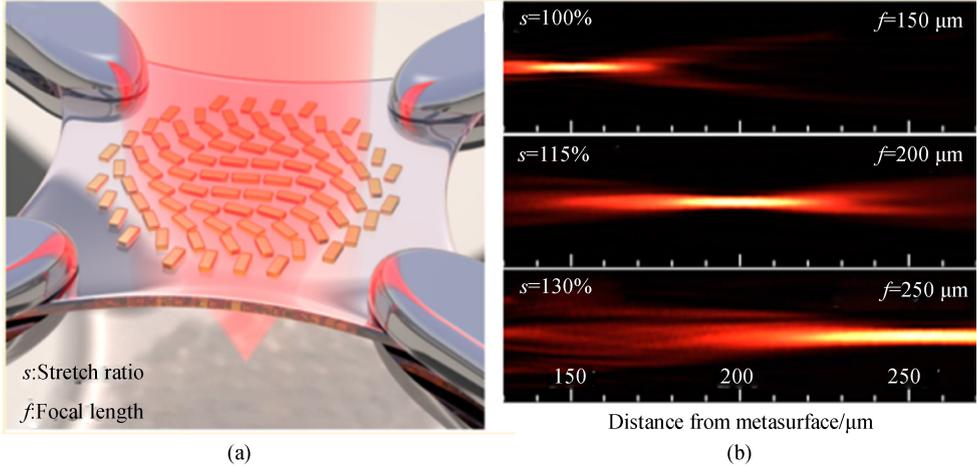


图 12 (a) 可拉伸 PDMS 上的超构透镜示意图;(b) 当 PDMS 拉伸率  $s$  分别为 100% , 115% 和 130% 时,变焦超构镜头的透射侧产生的纵向光束轮廓<sup>[40]</sup>

Fig. 12 (a) Schematic illustration of a metalens on stretched PDMS; (b) measured longitudinal beam profiles generated on the transmission side of the zoom metalens with stretch rate of PDMS( $s$ ) of 100% , 115% , and 130%<sup>[40]</sup>

当均匀拉伸 PDMS 薄膜时,实验结果如图 12(b)所示,在实验过程中,超构透镜位于  $z = 0$  处,实验测量得到当 PDMS 拉伸率  $s$  分别为 100% , 115% 和 130% 时,从变焦超构镜头的透射侧产生的纵向光束轮廓可以看出,其焦距可以从 150  $\mu\text{m}$  连续变化到 250  $\mu\text{m}$ ,成功获得了能够实现 1.7 倍变焦的柔性超构透镜。

同年,美国科学家 Andrei Faraon 等人将基于亚波长 a-Si 纳米柱的超表面封装在薄透明弹性聚合物(PDMS)中,设计并制备了一种工作在近红外(915 nm)波段的全介质变焦超构透镜<sup>[41]</sup>。对于具有聚焦焦距  $f$  的超构透镜而言,超构透镜的近轴相位分布具有如下形式:

$$\phi(\rho, \lambda) \approx \frac{\pi \rho^2}{\lambda f}, \quad (13)$$

其中  $\rho$  为超构透镜边缘到中心的距离,  $\lambda$  为工作波长。将器件夹在两个 Teflon(坚韧的合成树脂,

由四氟乙烯聚合而成)环之间,通过施加径向力将超构透镜纵向拉伸以改变其表面构成,当以  $1 + \varepsilon$  的拉伸率均匀拉伸基板,并且假设局部相变不依赖于基板变形,原先作用在半径为  $\rho$  处的相位分布现在作用在  $\rho(1 + \varepsilon)$  处,由此,应变相位轮廓变为:

$$\phi'(\rho, \lambda) \approx \pi \rho^2 / (\lambda(1 + \varepsilon)^2 f). \quad (14)$$

这样就使得超表面所具有的相位得以重新分布,从而改变了光波的波前以达到变焦的目的,如图 13(a)所示。可见,拉伸率为  $1 + \varepsilon$  的弹性超表面微透镜焦距缩放为  $(1 + \varepsilon)^2$  倍。

图 13(b) ~ (c) 的实验结果表明,当入射光波长为 915 nm 时,当应变值从 0 变化到 50% 时,其焦距从 600  $\mu\text{m}$  变化到超过 1 400  $\mu\text{m}$ ,屈光度超过 952,获得了有超过 130% 的焦距调整能力。

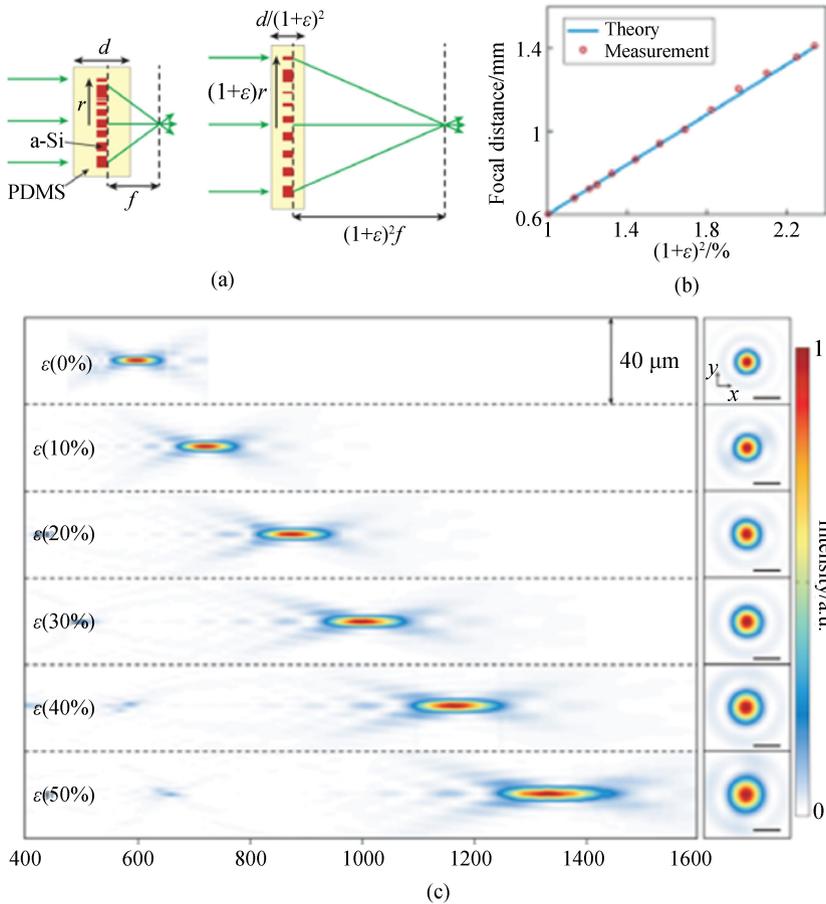


图 13 (a) 可调弹性超构透镜的示意图; (b) 测量和分析预测的对于不同应变值的焦距; (c) 实验测量得到的轴向平面(左)和焦平面(右)中的径向应变超构透镜( $\varepsilon = 0\%$  至  $50\%$ )的光强度分布<sup>[41]</sup>

Fig. 13 (a) Schematic diagram of tunable elastic metasurface lenses; (b) measured and analytically predicted focal distances at different strain values; (c) measured optical intensity profiles of a radially strained metasurface microlens ( $\varepsilon = 0\%$  to  $50\%$ ) in the axial plane (left) and the focal plane (right)<sup>[41]</sup>

2018年,美国西北大学的科学家利用3D打印技术制备了一种工作在毫米波范围的可拉伸全介质调焦超构透镜<sup>[42]</sup>。利用反向电磁设计法获得高抗冲聚苯乙烯(HIPS)超构透镜结构,利用3D打印技术进行制备,将所得全介质器件连接至可拉伸平台,在毫米波状态下进行纵向拉伸测试,如图14所示,从图14中可以看出,理论模拟和实验测量结果均显示随着拉伸系数增加,超构透镜的焦距变长,与理论公式相符:

$$f \approx \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^{\frac{3}{2}} \left(s^2 f_0 + s(s-1) \frac{L}{6}\right). \quad (15)$$

该器件可以实现4倍调焦,且拉伸系数仅为75%。当拉伸率 $s$ 为1时,所获得的聚焦光束直径为8.5 mm,非常接近 $D = 7.6$  mm的衍射极限

值,在 $0.8 < s < 1.2$ 时,实验测得的聚焦光束直径都非常接近衍射极限。

值得一提的是,所提出的超构透镜所使用的材料仅为传统菲涅耳透镜的44%,大大节约了制作成本。与此同时,利用反向设计法获得的超构透镜较传统菲涅耳透镜具有更高的聚焦效率。

### 3.3 基于微流体技术的可调谐超构透镜

基于微流体技术的可调谐超构透镜是通过向弹性空心的超构元素中注入不同量微流体形成微机械谐振器以实现光场的操控。微机械谐振器的打开/关闭通过物理上注入/抽取超构元素中的微流体来控制。利用这种方法可以实现逐个单元的实时动态调控,能够灵活控制光的聚焦特性,而且该纯物理方法避免了其他开关机理中常出现的

错误谐振与单元之间的串扰问题。2015 年,英国科学家 Nikolay Zheludev 等人将微流体技术与超材料相结合,提出了一种随机访问可重构超材料,

并利用该材料设计并制备了一种工作在 GHz 范围的调焦超构透镜,如图 15(彩图见期刊电子版)所示<sup>[43]</sup>。

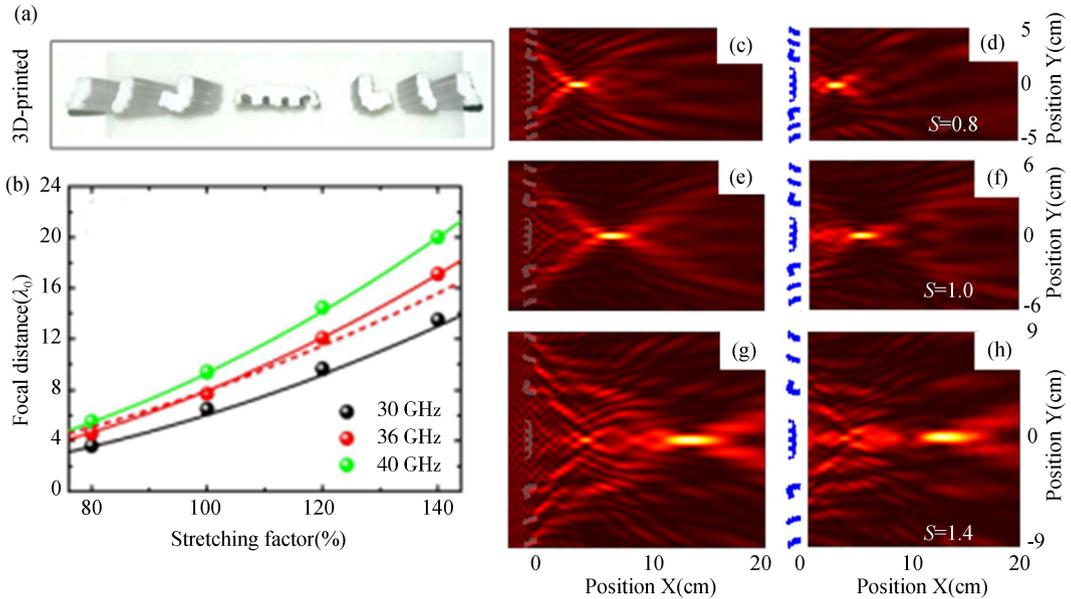


图 14 (a) 利用 3D 打印技术制备的高抗冲聚苯乙烯 (HIPS) 超构透镜照片。(b) 不同频率电磁波入射时,实验(球体)和理论(实线)的聚焦焦距随拉伸因子的变化曲线。虚线表示近轴近似中的理论距离。沿着器件轴向平面的模拟(左)和实验(右)光功率分布图,对应拉伸因子  $s = 0.8$ (c)和(d),1.0(e)和(f),以及1.4(g)和(h)<sup>[42]</sup>

Fig. 14 (a) Photograph of the 3D-printed HIPS lens. (b) Experimental (spheres) and theoretical (solid lines) focal distances as a function of the stretching factor. The dashed line represents the theoretical distance in the paraxial approximation. Simulated (left) and experimental (right) optical power profiles along the axial plane of the device with stretching factors  $s$  of 0.8 (c) and (d), 1.0 (e) and (f), and 1.4 (g) and (h)<sup>[42]</sup>

该超材料利用透明电介质制造的二维开口环形微腔阵列和两个相互垂直放置的微腔构成,如图 15(a)所示,首先利用微流体技术向每一个独立单元的微腔中注入液态金属(图 15(b)),并使其充满结构微腔以及宽通道。此时,开环谐振器将在特定波长(与环的半长相关)处显示出电偶极子吸收共振现象。然后通过精确设计的馈电装置来控制气动阀门,通过调节气动阀中的空气压力,从窄通道注入空气(蓝色),随着空气的注入,环中空隙不断加大,则可以逐渐减小共振波长,从而可以根据要求获得形貌不一且谐振频率各异的金属结构阵列(图 15(c))。与此同时,宽通道中的额外液态金属被空气排出(图 15(d))。这样的话,每个独立微腔单元都可以看作是一个可重

构谐振子,其谐振特性可以被随意连续的实时控制。如图 15(e)~15(g)所示,通过单独改变金属环开口间隙的取向和大小便可以实时控制出射电磁波的波前,以获得具有不同焦距的超构透镜。

研究人员在微波消声室内进行实验测量,喇叭天线作为波源,发出的 Y-偏振平面波沿着 Z 方向且垂直于超构表面传播,将单极天线安装在 xy 面扫描仪上面作为探头。为了映射透射场,接受探身以 5 mm 步长在与样品不同距离处扫描。实验时,为了保证器件的稳定性,使用微型插头密封进气口。当设计的焦距分别为  $5\lambda$ ,  $10\lambda$  和  $15\lambda$  时,相应的空间相位分布在图 15(e)~15(g)第 1 列中给出,其通过双曲透镜方程获得。实验结果如图 15(e)-15(g)中第 2 列所示。从三维全麦克

斯韦数值模拟的电场强度分布图可以看出,通过调节空间相位梯度可以将焦距  $F$  (这里,焦距被定

义为能量汇聚处中心与平面透镜之间的距离)从  $5.1\lambda$  调谐到  $15.2\lambda$ 。

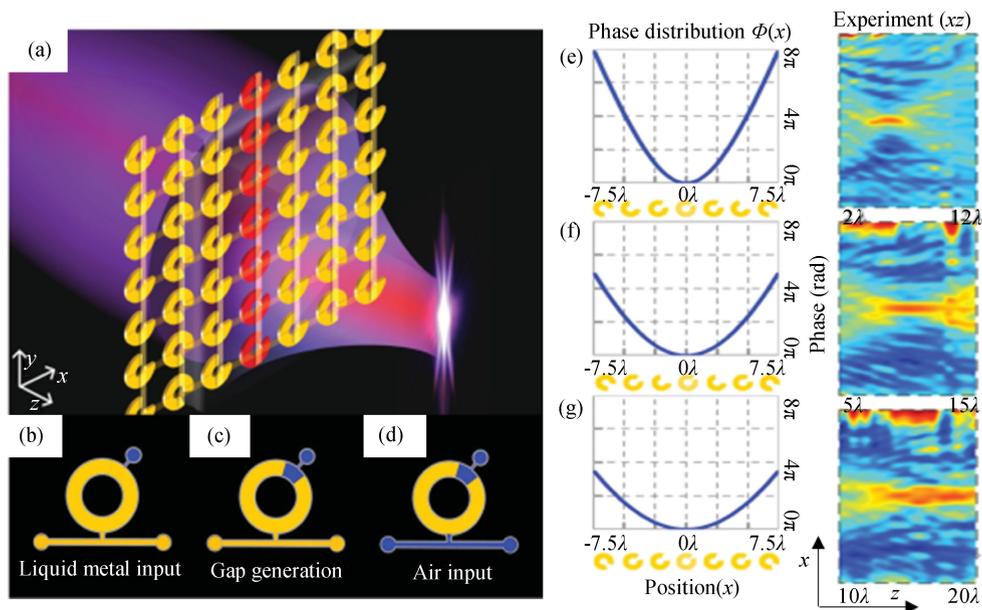


图 15 (a) 可调谐平面超构透镜结构示意图; (b), (c), (d) 调控过程示意图; (e)-(g) 当设计焦距分别为  $5\lambda$ ,  $10\lambda$  和  $15\lambda$  时, 不同相位梯度分布的实验结果<sup>[43]</sup>

Fig. 15 (a) Schematic of tunable flat metalens. (b), (c), (d) Schematic diagram of the regulation process; (e)-(g) experimental results of different phase gradient distributions when the designed focal length is  $5\lambda$ ,  $10\lambda$ , and  $15\lambda$ , respectively<sup>[43]</sup>

综上所述,基于微机电、柔性可拉伸材料以及微流体技术的机械可重构超构透镜是一种融合了超构透镜和微机械前沿技术的最佳功能的新型光学聚焦系统。其具有节能、微型、超薄、灵活调制等优势,将在柔性智能化光学设备、前沿自动化智能机械系统(机器人)、无人驾驶汽车和货车的周围环境扫描以及自主遥感遥测系统中有广泛的应用需求。

## 4 存在的问题

近年来,随着高精微纳加工工艺以及新型人工智能材料的蓬勃发展,使得可调谐变焦超构透镜在微机械、精密光电仪器、高效光学显示等领域的应用成为可能。然而,各类驱动机制的可调谐超构透镜的实验研究与实际应用之间依然存在着很多需要跨越的障碍。当前所面临的关键问题主要有以下几种:

(1) 受到光刻工艺分辨率的限制,难以在短波长范围内实现对单个超构元素进行实时调控,从而降低了器件的调制灵活性。

(2) 新型智能材料(如氧化锡,石墨烯等)的制备和转移工艺需要进一步完善以增强器件性能的稳定性的。

(3) 驱动介电弹性薄膜需要使用较高的电压,很难实现低功耗设计。

(4) 现有柔性可拉伸材料的拉伸性能有待进一步提高。因为这类柔性薄膜所固有的松弛现象会对器件光学性能的稳定性和器件寿命造成不利影响。

(5) 微流体技术和液晶的重构反应速率较低,使得器件难以实现快速调焦。

(6) 虽然相变材料提供了动态改变焦点位置的方法,但它的调整过程相当复杂,需要复杂的控制系统,尤其控制入射光束等,每次都需要写入、擦除以及重构,这使得动态调节实现起来比较困

难,削弱了动态调控的可行性。

## 5 总结与展望

进入21世纪以来,以人工智能,量子信息技术,虚拟现实以及智能生物科技为主的全新技术革新正在推动着社会的发展。智能一体化光电仪器、高精度生物检测设备、自适应光学成像系统等对可调谐超构透镜微型化、一体化、智能化的性能要求不断提升,激励着越来越多的科研人员投入到可调谐超构透镜的研究当中。本文阐述了不同类型的可调谐超构透镜。详细介绍了微波变容管、2D材料、电活性聚合物、透明导电氧化物、基于不同调谐机制的MEMS、柔性可拉伸材料、微流控技术以及液晶和相变材料等与超构透镜相结

合,实现聚焦性能的灵活实时调控,覆盖了多波段的工作频率。然而,现有器件在调制灵活性、性能稳定性、加工工艺可行性以及调制灵敏性等方面仍然需要不断提升。因此,寻找能与超构透镜更好结合的新型智能材料以及探索新的调谐机制迫在眉睫。

近年来随着科学家们对非线性光学的研究不断深入<sup>[44-46]</sup>,非线性可调光学超材料也得到了快速发展<sup>[4,47-48]</sup>,非线性超构透镜已经成为一个非常重要也极具发展前景的研究方向<sup>[49-50]</sup>。

综上所述,具有可实时动态调控、超轻超薄、易于集成、低成本低功耗以及易于加工制备的可调谐超构透镜优势众多,有着全方位替代传统光学透镜组的巨大潜力,必将在通讯、成像、生物、医疗以及军事等各大领域的应用中大放异彩。

## 参考文献:

- [1] OKU H, HASHIMOTO K, ISHIKAWA M. Variable-focus lens with 1-kHz bandwidth[J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2138-2149.
- [2] REN H W, WU S T. Variable-focus liquid lens[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- [3] 贾洁姝. 电控全息可变焦透镜的性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-7.  
JIA J SH. Performance study of tunable-focus electroholography lens[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1-7. (in Chinese)
- [4] 张检发, 袁晓东, 秦石乔. 可调太赫兹与光学超材料[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 349-364.  
ZHANG J F, YUAN X D, QIN SH Q. Tunable terahertz and optical metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 349-364. (in Chinese)
- [5] ZHELUDEV N I. The road ahead for metamaterials[J]. *Science*, 2010, 328(5978): 582-583.
- [6] FEDOTOV V A, MLADYONOV P L, PROSVIRNIN S L, et al.. Asymmetric propagation of electromagnetic waves through a planar chiral structure[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(16): 167401.
- [7] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al.. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [8] ZHELUDEV N I, KIVSHAR Y S. From metamaterials to metadevices[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 917-924.
- [9] KILDISHEV A V, BOLTASSEVA A, SHALAEV V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [10] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [11] GENEVE P, CAPASSO F, AIETA F, et al.. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139-152.
- [12] DING F, PORS A, BOZHEVOLNYI S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018, 81(2): 026401.
- [13] YU N F, AIETA F, GENEVE P, et al.. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [14] SIDDIQUE R H, MERTENS J, HÖLSCHER H, et al.. Scalable and controlled self-assembly of aluminum-based random plasmonic metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17015.
- [15] PORS A, NIELSEN M G, ERIKSEN R L, et al.. Broadband focusing flat mirrors based on plasmonic gradient metasur-

- faces[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(2): 829-834.
- [16] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.*. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [17] REN M X, WU W, CAI W, *et al.*. Reconfigurable metasurfaces that enable light polarization control by light[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(6): e16254.
- [18] 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.
- [19] WINTZ D, GENEVET P, AMBROSIO A, *et al.*. Holographic metalens for switchable focusing of surface plasmons[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3585-3589.
- [20] KHORASANINEJAD M, CAPASSO F. Metalenses: versatile multifunctional photonic components[J]. *Science*, 2017, 358(6367): eaam8100.
- [21] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al.*. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 187.
- [22] WANG SH M, WU P C, SU V C, *et al.*. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [23] CHEN K, FENG Y J, MONTICONE F, *et al.*. A reconfigurable active Huygens' Metalens[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(17): 1606422.
- [24] HUANG Z D, HU B, LIU W G, *et al.*. Dynamical tuning of terahertz meta-lens assisted by graphene[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(9): 1848-1854.
- [25] 陈懿宇, 田震. 石墨烯太赫兹波动态调制研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 86-97.  
CHEN X Y, TIAN ZH. Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 86-97. (in Chinese)
- [26] KIM T T, KIM H, KENNEY M, *et al.*. Amplitude modulation of anomalously refracted terahertz waves with gated-graphene metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700507.
- [27] SHE A L, ZHANG SH Y, SHIAN S, *et al.*. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9957.
- [28] FOROUZMAND A, SALARY M M, INAMPUDI S, *et al.*. A tunable multigate indium-tin-oxide-assisted all-dielectric metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1701275.
- [29] KAO T S, CHEN Y G, HONG M H. Controlling the near-field excitation of nano-antennas with phase-change materials [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2013, 4: 632-637.
- [30] CHEN Y G, KAO T S, NG B, *et al.*. Hybrid phase-change plasmonic crystals for active tuning of lattice resonances [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13691-13698.
- [31] MICHEL A K U, CHIGRIN D N, MA T W W, *et al.*. Using low-loss phase-change materials for mid-infrared antenna resonance tuning[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(8): 3470-3475.
- [32] CHEN Y G, LI X, SONNEFRAUD Y, *et al.*. Engineering the phase front of light with phase-change material based planar lenses[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 8660.
- [33] WANG Q, ROGERS E T F, GHOLIPOUR B, *et al.*. Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on phase change materials[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 60-65.
- [34] ZHONG J W, AN N, YI N B, *et al.*. Broadband and tunable-focus flat lens with dielectric metasurface[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(2): 537-541.
- [35] 秦雷, 谢晓瑛, 李君龙. MEMS 技术发展现状及未来发展趋势[J]. *现代防御技术*, 2017, 45(4): 1-5, 23.  
QIN L, XIE X Y, LI J L. Development status and future development trend of MEMS technology[J]. *Modern Defense Technology*, 2017, 45(4): 1-5, 23. (in Chinese)
- [36] LIN L Y, HERZIG H P. Introduction to the feature section on optical MEMS and nanophotonics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(9): 1235-1236.

- [37] ROY T, ZHANG SH Y, JUNG I W, *et al.*. Dynamic metasurface lens based on MEMS technology[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(2): 021302.
- [38] ARBABI E, ARBABI A, KAMALI S M, *et al.*. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 812.
- [39] COLBURN S, ZHAN A L, MAJUMDAR A. Varifocal zoom imaging with large area focal length adjustable metalenses [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 825-831.
- [40] EE H S, AGARWAL R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.
- [41] MAHSA KAMALI S, ARBABI E, ARBABI A, *et al.*. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.
- [42] CALLEWAERT F, VELEV V, JIANG SH ZH, *et al.*. Inverse-designed stretchable metalens with tunable focal distance [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(9): 091102.
- [43] ZHU W M, SONG Q H, YAN L B, *et al.*. A flat lens with tunable phase gradient by using random access reconfigurable metamaterial[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(32): 4739-4743.
- [44] ZHANG J F, MACDONALD K F, ZHELUDEV N I. Nonlinear dielectric optomechanical metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(8): e96.
- [45] OU J Y, PLUM E, ZHANG J F, *et al.*. Giant nonlinearity of an optically reconfigurable plasmonic metamaterial[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(4): 729-733.
- [46] AURO M P, SERGEI K T, KESTUTIS S. Gain through losses in nonlinear optics[J]. *Light: science & Applications*, 2018, 7, e43.
- [47] ZHU Y, HU X Y, FU Y L, *et al.*. Ultralow-power and ultrafast all-optical tunable plasmon-induced transparency in metamaterials at optical communication range[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2338.
- [48] DANI K M, KU Z, UPADHYA P C, *et al.*. Subpicosecond optical switching with a negative index metamaterial[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(10): 3565-3569.
- [49] CHEN J, WANG K, LONG H, *et al.*. Tungsten disulfide-gold nanohole hybrid metasurfaces for nonlinear metalenses in the visible region[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(2): 1344-1350.
- [50] SCHLICKRIEDE C, WATERMAN N, REINEKE B, *et al.*. Imaging through nonlinear metalens using second harmonic generation[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(8): 1703843.

#### 作者简介:



林雨(1991—),男,山东济南人,2017年于苏州大学获得硕士学位,现为中国科学技术大学纳米技术与纳米仿生学院博士研究生,主要从事微纳光电子学方面的研究。E-mail: ylin2017@sinano.ac.cn



蒋春萍(1973—),女,江苏常州人,博士,中科院“百人计划”研究员,博士生导师。2002年于中国科学院上海技术物理研究所获得理学博士学位。之后进入中科院半导体研究所,从事半导体自旋电子学方面的研究。2004年进入德国马普固体所,从事基于低维等离子体调控的新型室温太赫兹波发射源及探测器的研究。2008年加入中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所,从事过渡金属氧化物和氮化物特种材料的PLD生长及超表面技术的研究。E-mail: cpjiang2008@sinano.ac.cn