

# 光学学报

## 超构器件的设计、制造与成像应用

冷柏锐<sup>1</sup>, 陈沐谷<sup>1,2,3</sup>, 蔡定平<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>香港城市大学电机工程系, 香港 999077;

<sup>2</sup>香港城市大学生物系统、神经科学和纳米技术中心, 香港 999077;

<sup>3</sup>香港城市大学太赫兹及毫米波国家重点实验室, 香港 999077

**摘要** 超构光学为平面光学器件的发展提供了新的思路与方向。超构器件由亚波长人工纳米结构组成,能在二维平面上实现对入射光的振幅、相位和偏振的操纵。研究人员已经发展了多种超构表面技术,将其用于满足各式各样的光学需求。本文首先回顾了超构器件的前沿研究与技术发展现状,介绍了超构器件的广义设计流程,并以连续宽带消色差超构透镜为例进行逐步说明,帮助读者理解;然后,展示了多种超构器件加工方法,包括直写刻蚀、图案转移刻蚀和混合图案刻蚀等,进一步讨论了超构器件在成像应用中的发展,包括偏振成像、光场成像、光学感测以及生物成像等;最后,进行了总结,并对超构器件未来的发展提出了见解与展望。

**关键词** 光学设计; 超构器件; 超构表面; 纳米加工; 光学成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221877

### 1 引言

超构器件是基于超构表面或超材料所设计的功能性器件,其中超构表面是一种二维的超材料,是由亚波长尺寸的单元组成的人造结构,近年来备受平面光学学界的关注。超构表面的基本原理、设计、制造及其应用已经得到了充分的研究。构成超构表面的亚波长人造天线集可以在二维平面上操纵入射光的光学响应,如振幅、相位和偏振。因此,光不需要传播很远的距离便可以得到足够的调制,从而减少了强度的衰减,提高了工作效率。很多应用都可以基于平面光子学来实现,例如光束控制<sup>[1-3]</sup>、全息<sup>[4-9]</sup>、偏振控制和分析<sup>[10-13]</sup>、非线性生成<sup>[14-18]</sup>、激光加工<sup>[19-22]</sup>、成像<sup>[23-28]</sup>、聚焦<sup>[29-32]</sup>、彩色显示<sup>[33]</sup>,以及可调超构器件<sup>[34-36]</sup>、完美吸收器<sup>[37]</sup>、光场检测仪器<sup>[23, 27, 38-40]</sup>、人工智能(AI)增强的超构器件<sup>[41]</sup>、生物医疗设备<sup>[42-46]</sup>、高维量子纠缠光源<sup>[47]</sup>及其他新型超构器件的制备和应用。

超构表面还具有平坦、超薄、轻巧和紧凑的优点。与三维超材料相比,超构表面制造的复杂程度得到了显著降低。得益于纳米加工技术的成熟,超构表面可利用包括光刻这类在半导体集成电路制造中广泛应用的技术进行制造<sup>[30, 48]</sup>。为满足对纳米制造的日益增长

的需求,更多的加工技术被开发并应用于超构表面的制造之中,如干涉光刻<sup>[49-53]</sup>、自组装刻蚀<sup>[50]</sup>、纳米压印刻蚀<sup>[51]</sup>等。如图 1 所示:本文首先阐述了从设计亚波长单元结构,安排单元结构排布,到根据设计进行加工和功能验证的超构表面全设计流程;其次,回顾了超构表面的加工技术,包括商用半导体加工技术以及专为超构器件准备的加工技术;然后,展示了一些超构表面在光学成像的应用,包括偏振成像、光场成像、深度检测、边缘检测和生物显微成像等;最后,对超构器件的发展进行了总结并对未来进行展望。

### 2 设计流程

#### 2.1 方法与原理

超构器件设计和制造的一般原理和方法如图 2 所示。首先需要确定组成超构表面的基本单元——超构原子(meta-atom)或超构分子(meta-molecule)的设计。超构原子的光学特性主要由其纳米结构的几何形状和配置决定<sup>[54]</sup>,故需要确定用于制造纳米结构的材料的介电常数、磁导率和折射率等,以通过计算仿真得到该结构的色散函数等基本参数。使用商业软件 CST<sup>®</sup>、Lumerical<sup>®</sup>和 COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>等对透射或反射光谱进行仿真计算。通过这样的手段,可以获取各

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2022-11-18; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2022-12-10

基金项目: 中国香港特别行政区大学教育资助委员会/研管局卓越学科领域计划项目与优配研究基金(AoE/P-502/20, 15303521, 11310522)、广东省科学技术厅区域联合基金(重点项目)(2020B1515120073)、深港创新圈计划 D 类项目(SGDX2019081623281169)、香港城市大学研究基金(9380131)

通信作者: \*dptsai@cityu.edu.hk

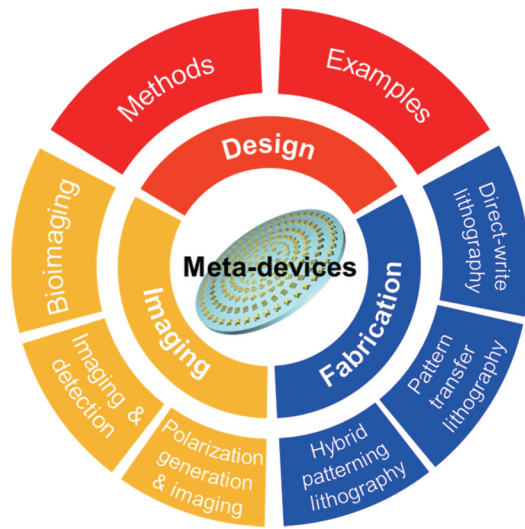


图 1 内容架构示意图

Fig. 1 Schematic of the topics in this review

种结构所具有的色散函数、效率、相位和偏振等光学性质<sup>[29]</sup>。将这些光学信息与其对应的纳米结构设计存入一个数据库中。随后,根据所设计的超构表面的功能,获取实现该功能所需要的表面相位、振幅或偏振分布。根据该分布,可以从以上数据库中快速选取与之匹配的结构单元。对要求苛刻的光学超构器件来说,在计算和设计中还需要考虑规格和制造的限制。半导体大规模生产过程的关键临界尺寸和经验参数可以帮助判断光学超构器件设计的可行性。在充分了解以上数据和信息之后,才能生成电子束刻蚀所用的光罩布局或用于大规模纳米制造的光刻掩模。使用微米或纳米光学光谱的实验光谱测量可以对超构原子或超构分子的实际功能进行验证。可以使用透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)、原子力显微镜(AFM)和近场扫描光学显微镜(NSOM)等实现对纳米结构、超构表面和超构器件的表征。此外,使用光学测试和测量来检查超构器件的参数也是重要的一步。

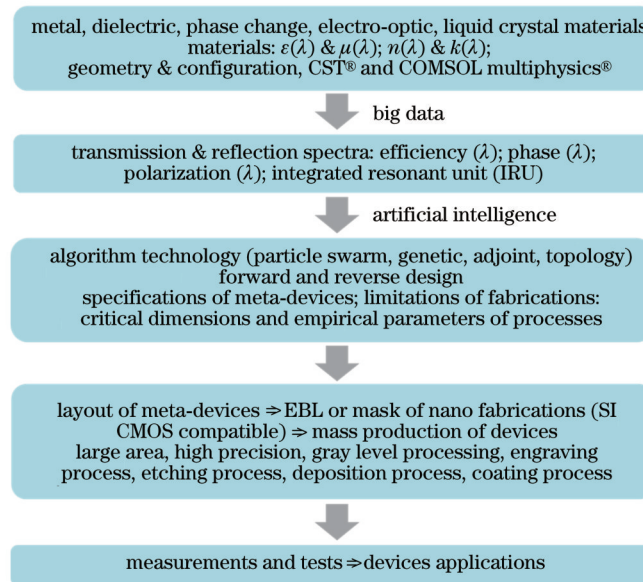


图 2 超构器件的设计、制造和测试流程

Fig. 2 Process of the design, fabrication, and characterization for meta-devices

下一小节中将以其中一种超构器件——光学消色差超构透镜的全流程设计为例,进一步说明并演示超构器件的设计、制造和测试流程。

## 2.2 光学宽带消色差超构透镜

在传统的光学成像过程中,一般需要使用复合透镜组来补偿色散,而复合透镜组的使用使得整个色散补偿系统变得大而笨重。超构表面和超构器件的出现则为消色差透镜的设计提供了一种有效的解决方案。以图 3(a)所示的反射式近红外宽带消色差超构透镜<sup>[30]</sup>为例,超构透镜表面的纳米结构如同一个个可以操纵入射光的超构原子,充当二级发射天线波源,产生特殊设计的波前,实现聚焦。

图 3(b)为聚焦超构透镜的一般色散相位分布图。

式(1)中给出了在设计焦距 $f$ 下,波长 $\lambda$ 、位置 $R$ 与所需的相位补偿之间的函数关系,即

$$\varphi(R, \lambda) = - \left[ 2\pi \left( \sqrt{R^2 + f^2} - f \right) \right] \frac{1}{\lambda}, \lambda \in \{ \lambda_{\min}, \lambda_{\max} \}. \quad (1)$$

从式(1)可以发现,最大波长( $\lambda_{\max}$ )和最小波长( $\lambda_{\min}$ )之间所需的相位补偿不同。为此,提出一个重要的创新性概念——微分相位(DP)方程,如式(2)和图 3(b)所示:

$$\varphi_{\text{Lens}}(R, \lambda) = \varphi(R, \lambda_{\max}) + \Delta\varphi(R, \lambda). \quad (2)$$

式(2)将式(1)的相位分为两个部分:第一部分为主要相位,如图 3(b)的红色区域所示。该相位仅与 $\lambda_{\max}$ 有关,不随波长的变化而变化,故可以利用几何相



位[图 3(c)所示的 Pancharatnam-Berry 相位]实现补偿。该相位可以通过将超构原子旋转特定角度  $\theta$  来产生  $2\theta$  的相变。另一部分为图 3(b)绿色区域所示的相位差  $\Delta\varphi(R, \lambda)$ , 可表示为

$$\Delta\varphi(R, \lambda) = -\left[2\pi\left(\sqrt{R^2 + f^2} - f\right)\right]\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}}\right). \quad (3)$$

为优化相位补偿带来的影响, 实现边缘对齐, 需要为式(3)添加额外的相位补偿  $\varphi_{\text{shift}}(\lambda)$ 。该相位不会影响超构透镜的聚焦特性, 则式(3)可优化改写为

$$\Delta\varphi'(R, \lambda) = -\left[2\pi\left(\sqrt{R^2 + f^2} - f\right)\right]\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}}\right) + \frac{a}{\lambda} + b, \quad (4)$$

式中:  $a = \delta \frac{\lambda_{\max} \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}$ ,  $b = -\delta \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}$ ;  $\delta$  表示在超构透镜中心处的最大相位补偿差。从式(4)可以发现, 该部分相位差与  $1/\lambda$  的变化呈线性关系, 故需要结构单元能提供随波数线性变化的相位补偿。据此, 提出一种满足式(4)需求的超构原子设计, 即集成共振单元 (IRU), 如图 3(d)所示。通常, 相位的补偿是利用结构

单元谐振处产生的相位实现的, 但谐振模式处的相位变化通常很剧烈, 无法实现宽带连续的相位补偿。集成共振单元则在单元结构中引入多个谐振模式, 利用谐振模式之间的平滑区域获得连续平稳的相位变化。通过引入更多的谐振模式, 可以获得更大的相位补偿范围。如图 3(d)的内插图所示, 谐振模式不仅可以调节单个谐振器的纵横比来获得, 还可以在单元中集成更多的谐振器来获得。由此, 利用集成共振单元的设计即可准确地补偿各波长聚焦所需的相位差。

按照图 2 所示的流程与前述设计原理, 制作了如图 3(e)所示的宽带消色差超构透镜。其中, 结构单元由金纳米棒组成, 设计数值孔径 NA 为 0.268, 直径为  $55.55 \mu\text{m}$ 。图 3(e)所示为该超构透镜的光学图像, 该图像表明透镜表面不同位置的光学响应不同。

图 3(f)中给出了图 3(e)所示超构透镜的局部放大 SEM 图像。从 SEM 图像中可以观察到, 不同半径位置的超构原子旋转角度不同, 这对应了几何相位的设计。同时, 不同结构设计的超构单元也可以从该图像中分辨出来。

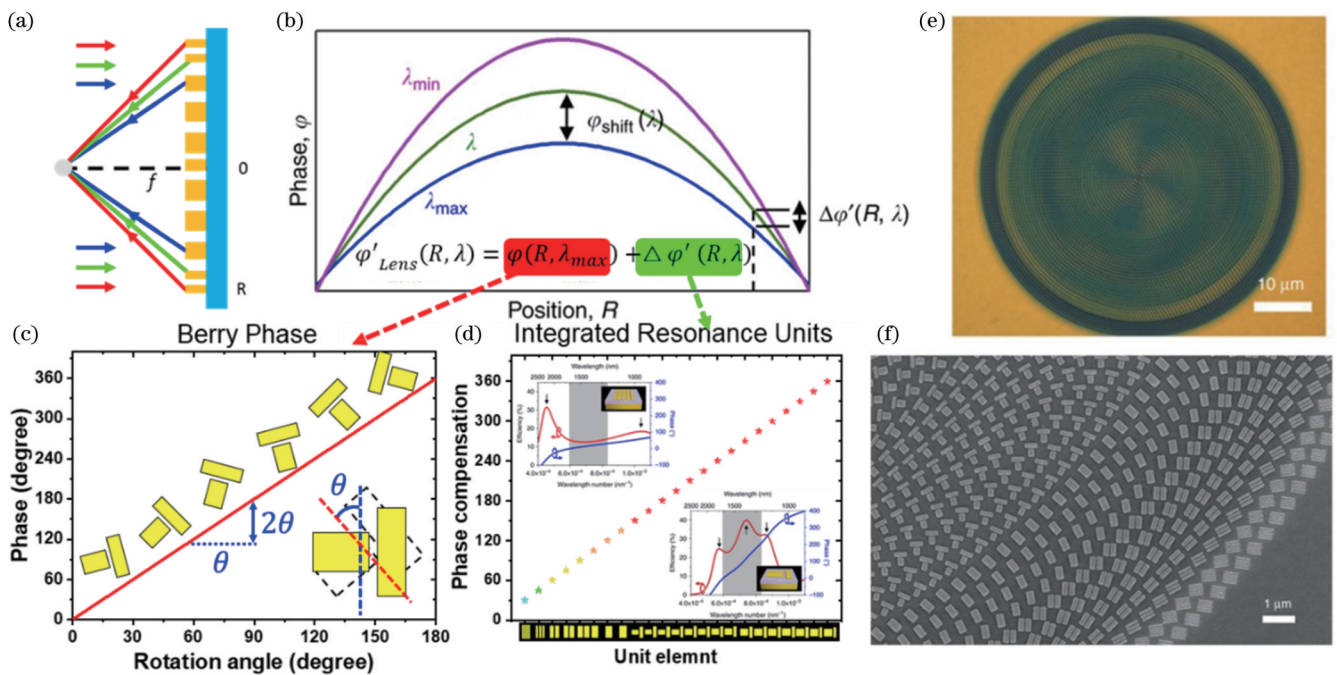


图 3 宽带消色差超构透镜的设计原理<sup>[30]</sup>。(a)消色差超构透镜的原理示意图;(b)宽带消色差超构透镜在不同波长下的相移分布图;(c)几何相位示意图,超构原子旋转  $\theta$  角将导致  $2\theta$  的相位积累;(d)能在连续宽带上实现不同相位补偿的集成共振单元示意图;(e)工作在近红外区域的宽带消色差超构透镜的光学图像;(f)相应的放大 SEM 图像

Fig. 3 Design principles of broadband achromatic meta-lens<sup>[30]</sup>. (a) Schematic of achromatic meta-lens; (b) shifted phase distribution for broadband achromatic meta-lens at different wavelengths; (c) schematic of the Pancharatnam-Berry phase, the rotation angle  $\theta$  of meta-atom results in a  $2\theta$  phase change; (d) IRUs with various phase compensations over continuous and broad bandwidth; (e) optical image of the broadband achromatic meta-lens in the near-infrared region; (f) corresponding zoom-in SEM image

该消色差超构透镜的表征结果如图 4 所示。焦距测量的实验装置如图 4(a)所示。从图 4(b)、(c)可以发现, 在  $1200 \sim 1680 \text{ nm}$  的测量范围内, 测得焦距  $f$  在  $100 \mu\text{m}$  左右, 与仿真结果一致, 证明该超构透镜具有

消色差的能力。此外, 在不同 NA 的设计中, 测得的焦距均与仿真结果一致, 保持在设定焦距附近, 进一步证明这样的设计准则可以广泛用于宽带消色差超构透镜的设计。

为进一步验证该消色差超构透镜的光学性能,还对其不同  $NA$  下的半峰全宽 (FWHM) 和工作效率进行测量,结果分别如图 4(d)、(e) 所示。测得焦平面处的 FWHM 范围为  $1.5\lambda \sim 2\lambda$ , 达到接近衍射极限的性能;在  $NA$  为 0.217、0.268 和 0.324 下测得的最高工作

效率分别为 8.40%、12.44% 和 8.56%。这表明由集成共振单元组成的消色差超构透镜具有良好的性能。此外,根据集成共振单元的设计理念,结合前述设计流程,还可以利用集成共振单元实现具有更多功能的光学超构器件。

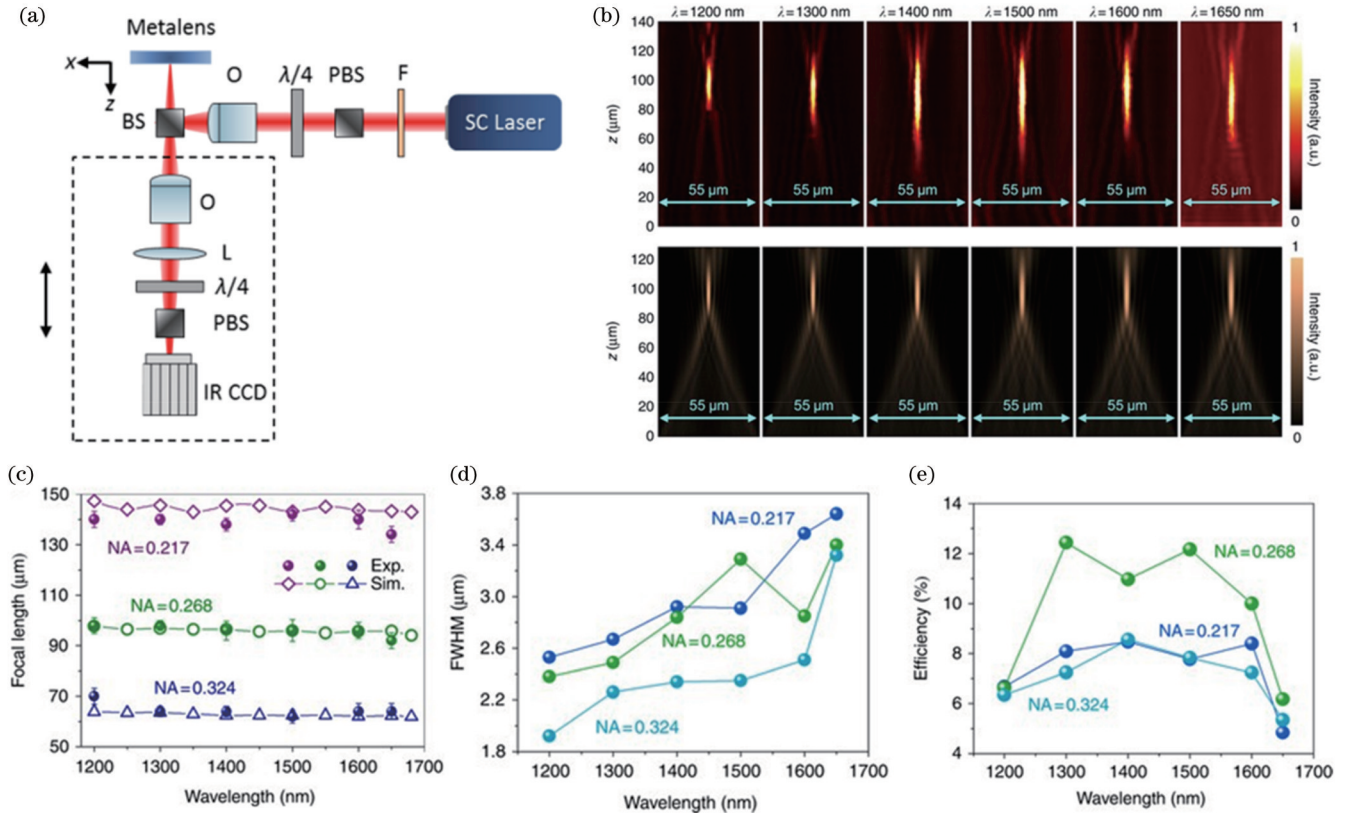


图 4 消色差超构透镜的表征<sup>[30]</sup>。(a) 聚焦特性测量的实验装置示意图; (b)  $NA=0.268$  时, 不同波长光照射下的光强度分布的测量结果(上)与仿真结果(下); (c) 不同波长光照射下的焦距测量结果; (d) (e) 在焦平面处测得的 FWHM 与工作效率结果

Fig. 4 Characteristics of the achromatic meta-lens<sup>[30]</sup>. (a) Schematic of experimental setup for focusing measurement; (b) measured (top) and simulated (bottom) light intensity profiles at different wavelengths when  $NA=0.268$ ; (c) measured focal length at different wavelengths; (d) (e) measured FWHM and operation efficiency at focal plane

### 3 加工技术

目前一般有三类成熟的超构器件加工方法, 分别是直写刻蚀、图案转移刻蚀和混合图案刻蚀。需要注意的是, 以上三类加工技术主要用于被动光学超构表面的加工制造, 主动可调超构表面<sup>[55]</sup>的制造方法则不在本文的讨论范围之内。

#### 3.1 直写刻蚀技术

光刻, 作为一种已大规模应用于半导体微电子制造的成熟纳米加工技术, 具备高产、大尺寸制造和大批量生产的优点。一般而言, 光刻技术利用聚焦透镜将光聚焦, 以便将光掩模上的几何图案转移到对光敏感的化学制品——光刻胶上, 从而实现纳米尺度的结构制造。由于聚焦光斑的大小(分辨率)受到衍射极限的限制, 若需要加工具有精细结构的超构表面, 则需要使用具有更短波长的光源。但是, 短波光源也有

其缺点, 例如容易造成镜片和掩模的损坏等。为了规避以上问题, 可以利用无掩模直写刻蚀技术来制造超构器件。无掩模直写刻蚀技术的分类及相应优缺点如表 1 所示。

粒子束刻蚀使用聚焦的高斯粒子束来产生粒子高度集中的聚焦点, 每一次写入并曝光一个像素点。其中两个比较成熟的方法是电子束刻蚀 (EBL) 和聚焦离子束刻蚀 (FIB)。电子束刻蚀以及图案转移技术可以根据其中材料生长的方式分为“自下而上”和“自上而下”两种纳米结构制造方法。前者采用原子或分子的蒸发或沉积, 辅以后期的剥离步骤, 就可以加工出纳米级结构; 后者则是指通过使用刻蚀工艺来得到纳米结构。

Wang 等<sup>[30]</sup>开发了一种“自下而上”的方法来加工在红外波段具有宽带光学特性的超构表面, 如图 5(a) 所示。第一步, 通过电子枪蒸发器把金 (Au) 沉积在硅



表 1 直写刻蚀技术的特性  
Table 1 Properties of direct-write lithography

Property	Particle beam		Mechanics	Laser	
	Electron-beam	Focused-ion beam	Probe scanning	Direct writing	Interference
Supreme property	High resolution	Milling under direct visualization	Vacuum chamber free	Low cost	High speed
	Good quality			Large area	Large area
Main challenge	Proximity effect	Ion beam damage	Poor aspect ratio	No batch process	Only for periodic structures
	High cost	High cost	High cost		

基衬底上形成一层金镜;第二步,使用等离子增强化学气相沉积(PECVD)将一层二氧化硅沉积到基板上,充当介电材料间隔层;第三步,将抗蚀剂层(电子胶)旋涂在准备好的基板上并在加热台上加热烘干,再将 Spacer 旋涂在抗蚀剂层上,而 Spacer 是一种具有高导电性的有机聚合物,它可以减少电子束曝光过

程中引起的位置误差;第四步,通过电子束曝光和显影定义超构表面的结构图案;第五步,通过金属蒸镀再沉积一层金原子;第六步,剥离多余的金属和抗蚀层,便得到最终所需要的超构表面结构。图 5(b)展示了利用该技术加工得到的超构表面的 SEM 图(俯视图)。

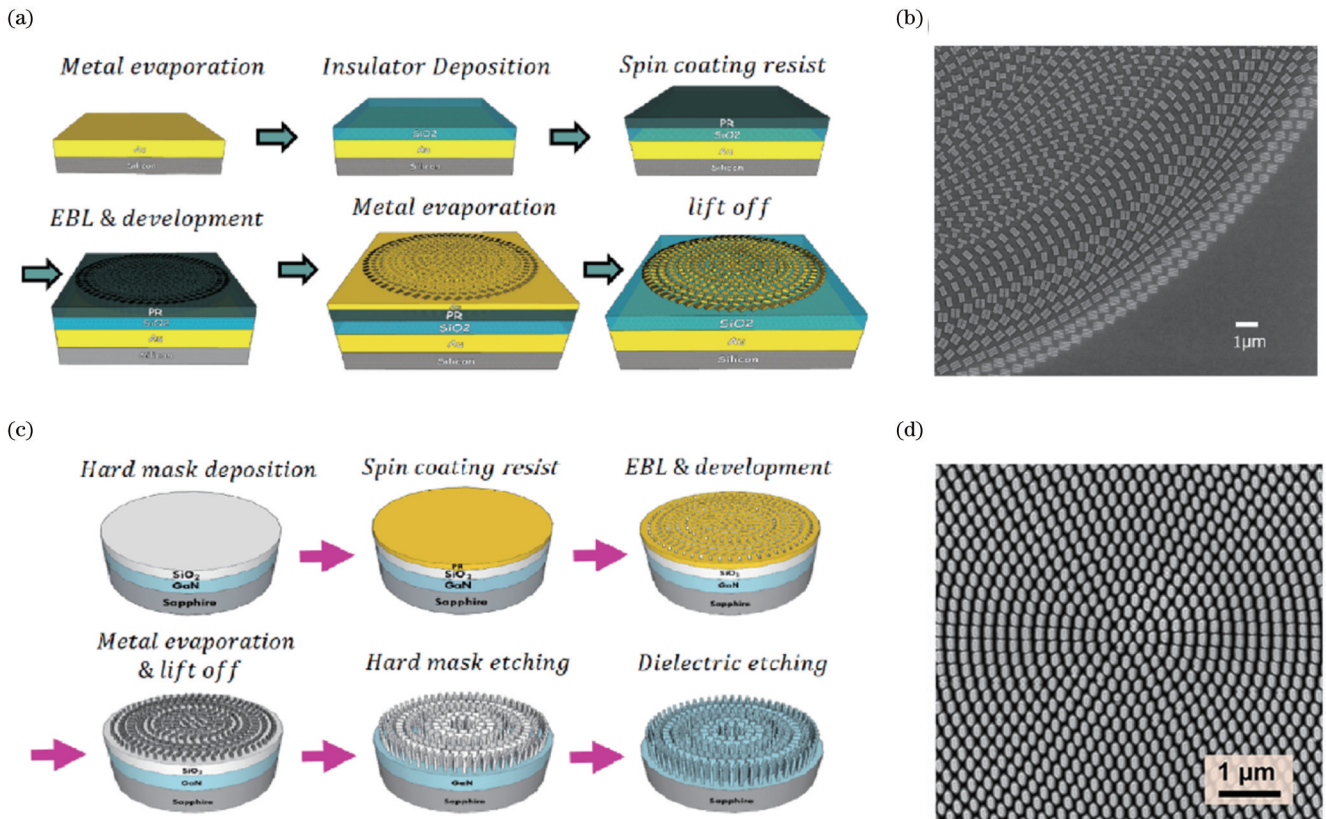


图 5 电子束刻蚀过程及 SEM 图像。(a)自下而上的刻蚀制造示意图<sup>[30]</sup>; (b)所制造的消色差超构器件的 SEM 图像<sup>[30]</sup>; (c)自上而下的刻蚀制造示意图<sup>[48]</sup>; (d)氮化镓超构透镜的 SEM 图像<sup>[48]</sup>

Fig. 5 Process and SEM images of electron-beam lithography. (a) Schematic of fabrication process for bottom-up method<sup>[30]</sup>; (b) SEM image of the fabricated achromatic meta-lens<sup>[30]</sup>; (c) schematic of fabrication process for top-down method<sup>[48]</sup>; (d) SEM image of the fabricated GaN meta-lens<sup>[48]</sup>

此外,提出一种自上而下的超构表面加工方法<sup>[48]</sup>,如图 5(c)所示。第一步,利用金属有机化学气相沉积(MOCVD)方法沉积一层未被掺杂的氮化镓,再利用 PECVD 方法沉积一层二氧化硅硬掩模;第二步,将抗

蚀层旋涂在待加工材料表面;第三步,使用电子束曝光进行刻蚀,然后显影清洗,得到目标图案;第四步,用电子枪蒸发器涂覆一层铬(Cr)作为刻蚀硬掩模,并且剥离不需要的抗蚀层和金属;第五步,通过反应离子刻蚀

(RIE)将图案转移到 $\text{SiO}_2$ 层;第六步,将具有图案的 $\text{SiO}_2$ 作为硬掩模层,通过电感耦合等离子体刻蚀(ICP-RIE)技术来刻蚀基板;第七步,用缓冲氧化物刻蚀(BOE)溶液去除 $\text{SiO}_2$ 硬掩模层,就可以得到基于氮化镓的透射式超构透镜。利用SEM得到其俯视图,如图5(d)所示。若想利用电子束刻蚀实现大规模制造,会面临以下的挑战:1)加工成本高;2)花费时间长;3)加工过程中需要高度稳定的环境;4)由于电子进入抗蚀层后会出现散射,电子束刻蚀的分辨率受到邻近效应的限制<sup>[56-58]</sup>。

另一种粒子束刻蚀技术是聚焦离子束刻蚀。该技术是用离子束,而不是电子束的一种一步刻蚀工艺,通

过纳米精度的溅射技术对样品表面进行加工,辅以SEM,可以形成所谓的“双束系统”,使聚焦离子束刻蚀实现直接可视化的功能。利用该系统可以同时观察和加工样品的任意指定位置。图6(a)展示的是利用这种技术制造的能产生并聚焦涡旋光的超构表面SEM图像<sup>[59]</sup>。也有研究人员利用该技术制造可见光全息图超构表面<sup>[60]</sup>。因为该刻蚀技术的成本高、产量低,故不适用于大面积生产。此外,其在制造过程中也面临诸多挑战,例如纵横比有限、离子掺杂浓度高、研磨时间长导致的样品漂移,以及在成像和铣削过程会造成样品的损伤。

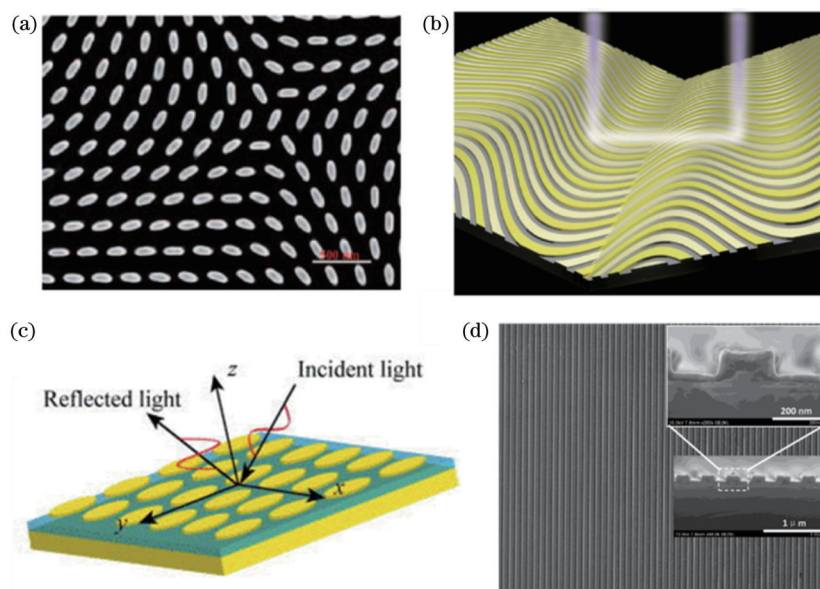


图6 直写光刻技术制备的超构表面。(a)利用聚焦离子束刻蚀制备的超构表面的SEM图像<sup>[59]</sup>; (b)在印刷电路板技术中使用激光直写制作的超构表面<sup>[61]</sup>; (c)利用正交激光干涉光刻技术制备的超构表面<sup>[49]</sup>; (d)利用激光干涉光刻技术制造的各向异性超构表面的SEM图像<sup>[62]</sup>

Fig. 6 Metasurfaces fabricated by direct-write lithography. (a) SEM image of the FIB-fabricated metasurface<sup>[59]</sup>; (b) schematic of the fabricated metasurface using LDW in print circuit board (PCB) technology<sup>[61]</sup>; (c) schematic of a metasurface fabricated by orthogonal LIL<sup>[49]</sup>; (d) SEM image of the anisotropic metasurface produced by LIL<sup>[62]</sup>

探针扫描刻蚀(PSL)是另一种用于纳米制造的技术,它的分辨率由其所采用的AFM技术决定。它利用探针刮刻在抗蚀剂(刻蚀胶层)上形成所需要的纳米图案,或将纳米粒子排列成所需图案。Jakšić等<sup>[63]</sup>提出一种工作中红外波段的有负折射率的超构表面,该超构表面是通过探针扫描刻蚀技术加工的,而表面形貌图由AFM得到。基于AFM的探针扫描刻蚀系统的主要问题是其纵横比较小——“划痕”相对较宽,但高度较小。

为解决纳米加工中结构纵横比小的问题,还开发了其他器件,如扫描隧道显微镜(STM)和扫描近场光学显微镜(SNOM)。然而,它们的制造速度慢,价格高昂。为了实现批量样品制造,需要进一步改进探针扫描刻蚀技术,使其能用于大规模工业生产。

针对具有更好灵活性、更高精度、更好均匀性的大面积制造技术的需求,衍生出两种基于激光的无掩模方法——激光直写(LDW)光刻和激光干涉光刻(LIL),这两种方法均能够快速且低成本地加工微纳米结构。

激光直写光刻利用计算机控制的光学系统,不使用掩模,直接将所需的纳米图案投射到光刻胶上。它不仅能对那些很难进行机械加工的材料进行纳米加工,还能加工立体的三维结构——通过调节激光曝光剂量直接在不同的光敏材料(光刻胶)中打印出所需的3D表面轮廓。Guo等<sup>[61]</sup>利用该工艺设计并制造了具有连续形状的超构表面,抑制了离散系统中产生的相位噪声,如图6(b)所示。激光直写加工所用到的材料和系统成本相对较低,并且可以配合空间光调制器(SLM)和可调振镜的使用来进行大面积、高效率的样品加工。故激光直写光



刻有效地兼顾了加工成本和大批量加工两个方面。但是,这种方法的缺点是它不能进行批量处理,每个样品都要独立加工,无法进行批量生产。

为了能用激光来制备大面积、周期性的纳米结构,另一个可行的做法是利用两束或多束相干激光束之间的干涉直接产生大面积的周期图案。利用上述双光束 LIL 技术,可以加工出能实现线偏振转换的超构表面<sup>[49]</sup>,该超构表面由平面椭圆形的等离激元谐振腔阵列组成,如图 6(c)所示。通过非共面光束多次曝光的激光干涉光刻可以产生更复杂的周期纳米结构<sup>[53]</sup>。图 6

(d)所示即为一种利用正交激光干涉光刻技术制造的含有二维复杂纳米结构的超构表面,这个器件可作为一个宽带的、高效的反射式波束偏振分离器<sup>[62]</sup>。激光干涉光刻是一种大面积、高效、廉价、无掩模的批量生产技术,但是仅适用于周期性纳米图案的加工。

### 3.2 图案转移刻蚀

图像转移刻蚀是为了满足高产量和大批量制造要求而发展起来的一类技术,其特性如表 2 所示。本节将介绍几种属于这一范畴的技术,包括等离激元、纳米压印和自组装刻蚀。

表 2 图案转移刻蚀的特性

Table 2 Properties of pattern transfer lithography

Property	Plasmon	Nano-imprint	Self-assembly
Supreme property	High throughput	High yield	Large area
		Mass production	Low cost
Main challenge	Large area photomask	High resolution mold	Uniformity
		Residual imprint layer	Limited patterns

等离激元刻蚀技术可用于获得超越衍射极限的深亚波长分辨率。将介质层夹在具有亚波长纳米结构的掩模和光敏电阻涂层衬底之间。垂直入射光在金属和介质界面将激发自由电子振荡,产生表面等离激元(SPP)。SPP 波能够将光场限制在一个比入射光的波

长小得多的尺度内。当该结构作为光源出现于光阻涂层基板上时,可获得较好的亚波长特性。带有银透镜的反射等离激元刻蚀结构示意图<sup>[64]</sup>如图 7(a)、(b)所示。Luo 等<sup>[64]</sup>使用该技术制备了各向异性的阵列纳米槽超构表面。金属损耗的存在,导致该刻蚀产生的

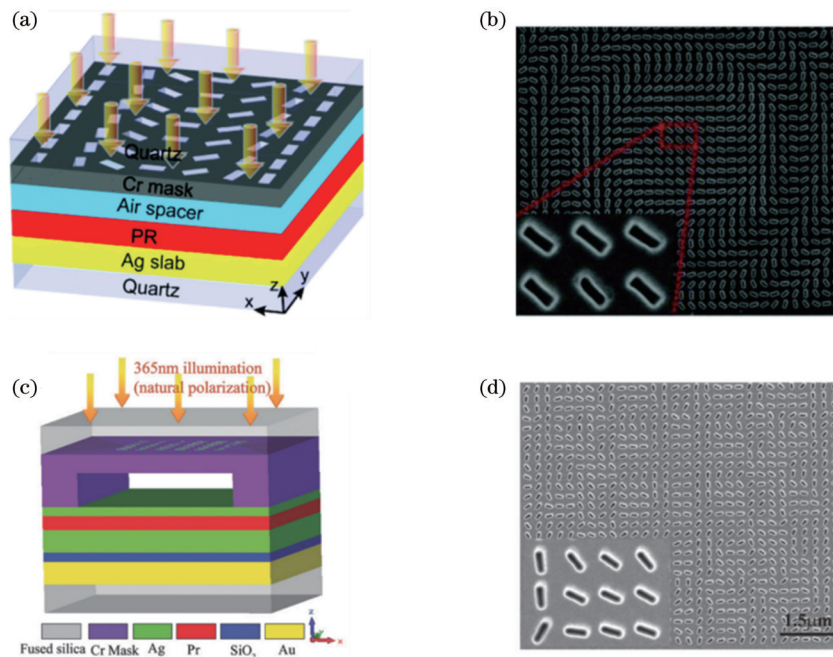


图 7 等离激元刻蚀技术的刻蚀结构及 SEM 图像。(a)银透镜成像反射等离激元刻蚀结构示意图<sup>[64]</sup>;(b)反射等离激元刻蚀法所使用的 Cr 掩模的 SEM 图像<sup>[64]</sup>;(c)由 Cr 掩模和 Ag/PR/Ag 等离激元腔组成的等离激元腔刻蚀系统示意图<sup>[65]</sup>;(d)对应的 Cr 掩模的 SEM 图像<sup>[65]</sup>

Fig. 7 Etched structure and SEM images of plasmonic lithography. (a) Schematic of the imaging reflective plasmonic lithography structure with a silver lens<sup>[64]</sup>; (b) SEM image of the corresponding Cr mask for reflective plasmonic lithography<sup>[64]</sup>; (c) schematic of plasmonic cavity lithography system consisting of a Cr mask and a Ag/PR/Ag plasmonic cavity<sup>[65]</sup>; (d) SEM image of the corresponding Cr mask patterns<sup>[65]</sup>

SPP 波的传播距离很小。因此,需要在掩模的下面放置一个超构透镜,以提高通过掩模投射到刻蚀胶上的效率<sup>[65]</sup>,如图 7(c)、(d)所示。由于超构透镜具有负折射率,这种嵌入超构透镜的 SPP 刻蚀将使入射光与表面的法线方向形成一个负角度。此种刻蚀技术具有高通量和低成本的优点,但分辨率需要进一步提高,且目前还无法制出用于大规模生产的大面积光掩模。

纳米压印刻蚀(NIL)是一种利用机械变形来复制

纳米结构的技术。通常的 NIL 是通过将纳米结构母模压制在基板上,同时通过加热(即热 NIL)来固化涂覆在基板的聚合物。当模具从基板上分离后,图案即被转移到聚合物层。热纳米压印刻蚀已被用于制备混合钙钛矿超构表面<sup>[66]</sup>,如图 8(a)、(b)所示;用于制备超薄偏振等离子体超构表面<sup>[51]</sup>,如图 8(c)所示;用于制备高效超宽带反射器的全介质超构表面<sup>[67]</sup>,如图 8(d)所示。

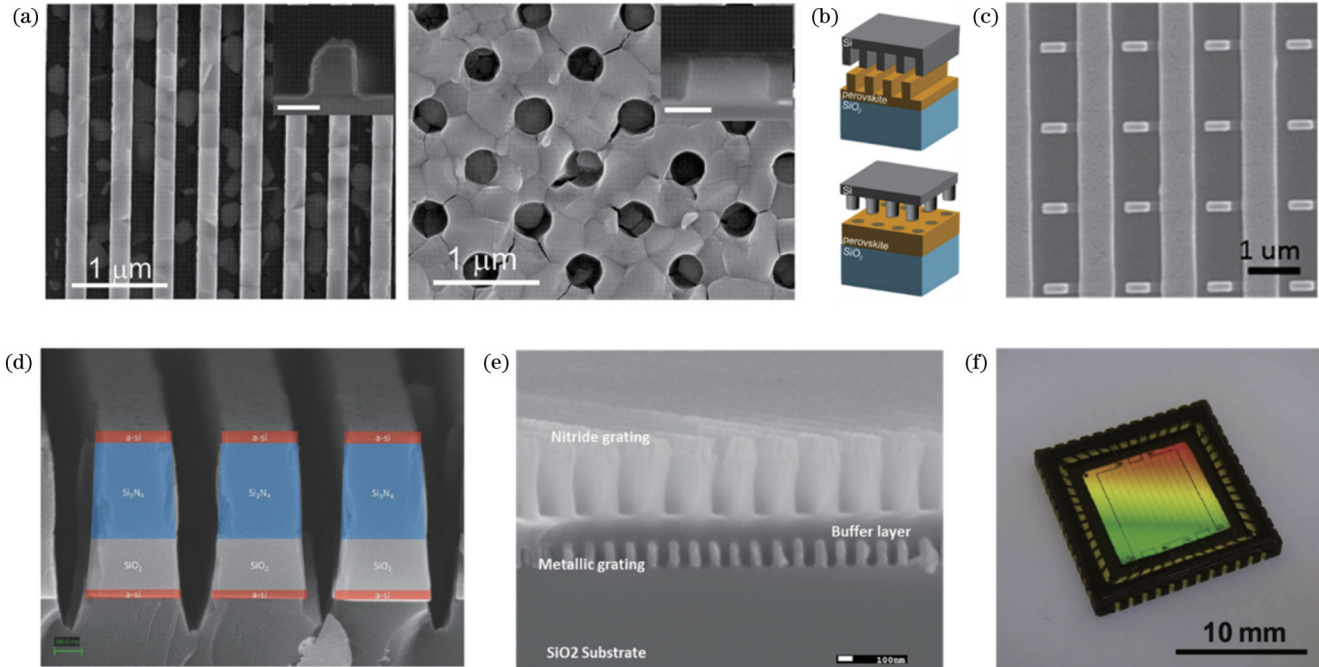


图 8 利用纳米压印刻蚀制备的超构表面。(a)利用热纳米压印制备的分别由纳米带(左)和纳米孔(右)组成的超构表面<sup>[66]</sup>;(b)制备纳米带(上)和纳米孔(下)所使用的压印模板的示意图<sup>[66]</sup>;(c)(d)利用热纳米压印刻蚀制备的超构表面的 SEM 图像<sup>[51, 67]</sup>;(e)利用紫外纳米压印刻蚀加工的超构表面的 SEM 图像<sup>[68]</sup>;(f)经过封装的由紫外纳米压印刻蚀加工的超构表面发射器图像<sup>[69]</sup>

Fig. 8 Metasurfaces fabricated by nano-imprint lithography. (a) SEM images of metasurfaces with nanostripe (left) and nanohole (right) structures fabricated by thermal-NIL<sup>[66]</sup>; (b) corresponding schematic of imprinting molds for nanostripes (upper) and nanoholes (bottom)<sup>[66]</sup>; (c) (d) SEM images of thermal-NIL-fabricated metasurfaces<sup>[51, 67]</sup>; (e) SEM images of UV-NIL-defined metasurface<sup>[68]</sup>; (f) photograph of packaged metasurface emitter constructed by UV-NIL<sup>[69]</sup>

还有一种方法是紫外纳米压印刻蚀(UV-NIL),该方法使用旋涂方法覆盖基板上的液相聚合物。在压印过程中,聚合物经紫外线辐射后形成聚合物交联,将聚合物固化。为此,模具必须采用对紫外光透明的材料,并能在室温/低压下压力下进行加工。Yao等<sup>[68]</sup>利用UV-NIL技术实现了超构表面,如图8(e)所示。该设计在可见光到红外的波段内具有单向光传输的功能,并且具有较好的消光效果。图8(f)所示的用于红外二氧化碳传感的超构表面热发射器也是用UV-NIL技术制造的,在压印过后需利用可溶性UV抗蚀剂进行单层剥离<sup>[69]</sup>。

当需要进行大面积的纳米结构制造时,可以使用自组装刻蚀技术,该技术具有高效和简便的特点。纳米球刻蚀(NL)技术是一种有很大应用潜力的自组装技术。该技术将低成本的胶体自组装聚苯乙烯(PS)球用

作硬掩模,与刻蚀或沉积技术相结合。如图9(a)所示,规则排列的纳米球的生成过程简单且成本低廉<sup>[70]</sup>。聚苯乙烯球在空气和水界面上自组装成紧密排列的六角形晶格,然后从容器中缓慢抽出水,将单分子层转移到目标基板上。Bonod<sup>[71]</sup>制出一种在绝缘体上涂覆硅基板(SOI)的介质超构表面,单层自组装的PS球在刻蚀过程中起硬掩模的作用。测得样品的反射率对PS技术所留下的无序残余物不敏感。这是因为硅柱中发生了磁偶极子谐振,而非电偶极子谐振。全介质超构表面也可以通过NL工艺在柔性衬底上制作,可用于传感领域<sup>[70]</sup>,如图9(b)、(c)所示。上述柔性衬底由聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)制成,这是因为该聚合物在可见光波段是透明的,故通常用于承载复杂的电子系统。

传统的纳米球刻蚀迄今为止仅能产生简单的周期图案。为了得到更复杂的周期性纳米结构,研究人员



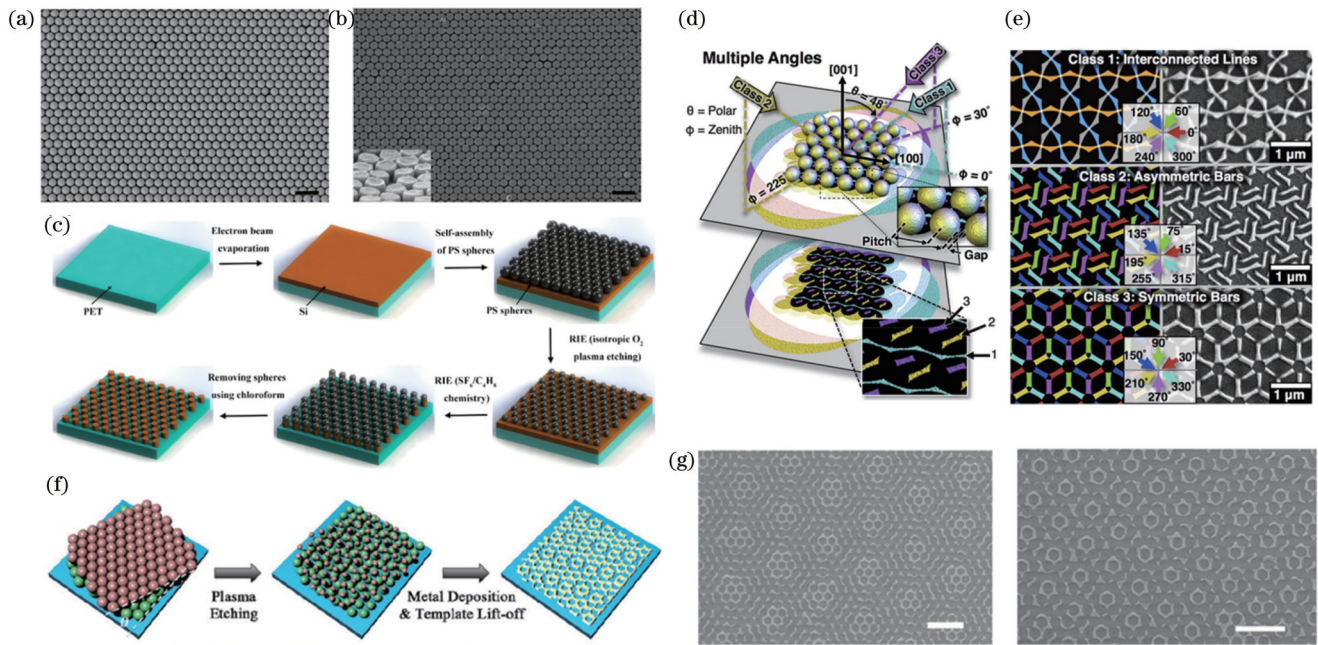


图9 自组装刻蚀。(a)适用于NL技术的自组装PS球的SEM图像;(b)由NL和RIE加工所形成的硅基-圆柱超构表面的SEM图像;(c)柔性、全介电超构表面的主要制造程序示意图<sup>[70]</sup>;(d)多角度沉积实现超构表面的示意图;(e)不同投影角下缩成结构示意图(左)与SEM图像(右)<sup>[72]</sup>;(f)利用NL技术制造 Moiré 超构表面的示意图;(g)图9(f)中PS球在平面内旋转角度 $\theta=12^\circ$ 和 $\theta=19^\circ$ 时所成的 Moiré 超构表面的SEM图像<sup>[73]</sup>

Fig. 9 Self-assembly lithography. (a) SEM image of self-assembled PS shperes for NL; (b) SEM images of Si-cylinder metasurface formed with NL and RIE; (c) schematic of the main fabricating procedures for the flexible, all-dielectric metasurface<sup>[70]</sup>; (d) schematic of the multi-angled deposition for metasurface realization; (e) schematic and SEM images of the features under different projection angle<sup>[72]</sup>; (f) schematic of the fabrication of Moiré metasurfaces by the NL technique; (g) SEM images of two representative Moiré metasurfaces with in-plane rotation angle at  $\theta=12^\circ$  and  $\theta=19^\circ$ <sup>[73]</sup>

已经提出了一些改进的纳米球刻蚀技术。阴影纳米球刻蚀利用多个等离子体腐蚀的胶体掩模从多个角度连续沉积来制造更复杂的结构<sup>[72]</sup>,如图9(d)、(e)所示。操纵球体的阴影提供了一种高效的生成周期超构表面的新办法。此外,利用堆叠的两层聚苯乙烯纳米球和金属沉积掩模的 Moiré 纳米球进行刻蚀,可以产生具有 Moiré 图案的超构表面<sup>[73]</sup>,如图9(f)、(g)所示。该超构表面具有高旋转对称性,支持多种表面等离子体

模式,从而增强了宽带场。总之,纳米球刻蚀技术是一种非常实用的技术,可用于大片的基板制备,但存在均匀性不足的问题。

### 3.3 混合图案刻蚀

混合图案刻蚀是一种结合上述不同刻蚀方法的技术,能实现具有更复杂纳米结构的超构表面制作。混合图案刻蚀的特性如表3所示,下面将介绍两种混合图案的方法。

表3 混合图案刻蚀的特性

Table 3 Properties of hybrid patterning lithography

Property	Micro-sphere projection lithography	Hole-mask colloid & off-normal deposition
Supreme property	Rapid design	Large area
	Large area	Tilted structure
	Low cost	
Main challenge	Uniformity	Uniformity

微球投影刻蚀技术能快速制造周期与准周期超构表面结构。该技术把能自组装的二氧化硅球阵列当作胶体微透镜。这些微透镜能分别将远处的大尺寸掩模所携带的图案投射到涂覆后的基板上<sup>[74]</sup>。图10(a)给出一种非周期超构表面的制造过程示意图。该超构表面便是利用硅模板将图案转移到基板上。

这些纳米小球仅会粘附在硅片上填充有聚乙烯亚胺(PEI)的孔内,随后用丁烷喷枪热分解去除PEI。用聚合物板抓取小球阵列,然后让其与基板接触。经曝光显影后,通过金属化和剥离或刻蚀实现图案转移<sup>[74]</sup>,利用该方法得到的超构表面如图10(b)所示。

该方法能加工尺寸在 $0.4\sim 10\ \mu\text{m}$ 的结构,符合超

构表面研究的加工需求;其低成本、快速制造的特征满足了研究上需要快速验证的需求。

目前,具有倾斜纳米柱且能够保证其紧凑、可扩展特性的定向超构表面<sup>[52]</sup>很难实现大批量、高性价比生产。图 10(c)所示为一种能大批量便宜生产纳米柱的方法,该方法结合孔掩模胶体刻蚀和非垂直沉积法来制备定向超构表面<sup>[52]</sup>。首先,将 PS 球随机分散在涂有聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的基底上,沉积一层金属薄膜;然后,通过胶带剥离去除 PS 球,以形成孔掩模。从非垂直方向沉积后去除 PMMA,便会形成偏倾斜的纳米柱。

图 10(d)显示了具有面外( $z$ 轴方向)不对称的倾斜亚波长金纳米柱的等离激元超构表面。光入射在该超构表面时会从这些不对称结构上散射,从而产生方

向性的光学响应。

需要注意的是,除了以上三类加工方法以外,超构表面的图案也可以通过光刻获取,与现有半导体微电子制造的工艺展现出很强的兼容性。Park 等<sup>[75]</sup>使用深紫外(DUV)投影光刻技术证明可在 4 inch (1 inch=2.54 cm)熔融石英晶片上实现超构透镜加工。图 10(e)给出了利用 DUV 投影光刻制造超构透镜的流程。首先通过 DUV 投影光刻、干刻蚀将图案转移到铬。随后将铬作为硬掩模,用氟化物气体作为干刻蚀,得到纳米柱结构。这样的加工工艺实现了厘米尺寸的光学超构透镜的制造,如图 10(f)所示。DUV 光刻给出了另一种批量生产大尺寸超构器件的方法,但存在分辨率较低,且成本较高的缺点。

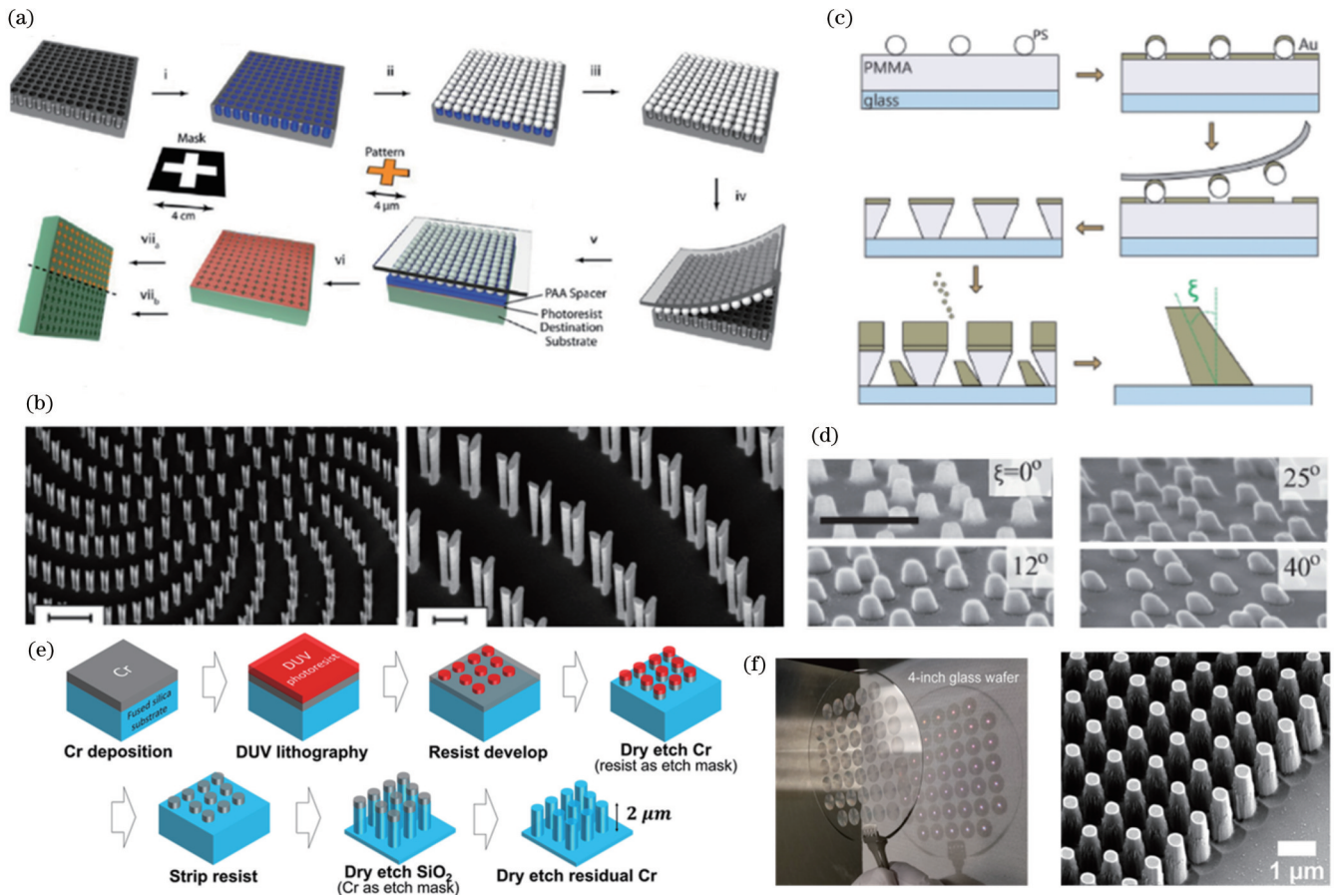


图 10 混合图案刻蚀与光刻技术的流程及 SEM 图像。(a)微球投影刻蚀工艺流程示意图<sup>[74]</sup>;(b)从投影刻蚀得到的非周期超构表面的 SEM 图像(左)与其放大图(右),比例尺分别为  $20\ \mu\text{m}$  和  $5\ \mu\text{m}$ <sup>[74]</sup>;(c)用孔掩模胶体刻蚀和非垂直沉积制备倾斜纳米柱的流程示意图<sup>[52]</sup>;(d)不同倾角下制备样品的 SEM 图像,比例尺为  $500\ \text{nm}$ <sup>[52]</sup>;(e) DUV 投影光刻技术加工超构透镜的流程示意图<sup>[75]</sup>;(f)超构透镜的图片(左)与 SEM 图像(右)<sup>[75]</sup>

Fig. 10 Process and SEM images of hybrid patterning lithography & photolithography. (a) Schematic of fabrication process flow for micro-sphere projection lithography<sup>[74]</sup>; (b) SEM image of a non-periodic metasurface by projection lithography (left) and the corresponding zoom-in image (right), and the scale bars are  $20\ \mu\text{m}$  and  $5\ \mu\text{m}$ , respectively<sup>[74]</sup>; (c) schematic of the fabrication process for tilted nano-pillars using hole-mask colloidal lithography and off-normal deposition<sup>[52]</sup>; (d) SEM images for the fabricated samples with various tilting angles, and the scale bar is  $500\ \text{nm}$ <sup>[52]</sup>; (e) fabrication procedures for meta-lens using DUV projection lithography<sup>[75]</sup>; (f) photo and SEM image of meta-lens on glass wafer<sup>[75]</sup>



## 4 成像应用

### 4.1 偏振的产生与成像

一般来说,光的偏振状态可以通过晶体的双折射特性获得,利用两个正交偏振分量在传播时积累的相位不同改变偏振状态。这样获得的偏振控制设备体积通常较大,并受到工作带宽窄和可选材料有限等的限制。超构表面则展现出解决这些问题的能力。

图 11(a)所示为利用反射式超构表面实现任意偏振所产生的器件<sup>[13]</sup>。该器件可将整个可见光谱内的线偏振入射光转化为任意偏振的光束,并能将这些偏振分离开。其中,不同偏振的产生可以通过改变 RCP 与 LCP 之间的相位差来获得,如图 11(a)的右图所示。而偏振的分离利用了几何相位方法,通过产生不同的空间相位梯度变化来产生不同的反射角,分离不同偏振状态的反射光束。该方法产生的偏振纯度极高,能与商业产品相媲美。

Yu 等<sup>[76]</sup>利用超构表面制作了一种宽带无背景散射光的四分之一波片,在宽带波长范围(5~12  $\mu\text{m}$ )内

可以产生椭圆度大于 0.97 的高质量圆偏振光,如图 11(b)所示。利用 V 型天线,他们设计了由两组指向不同的天线组成的单元,使每个子单元中对应的偏振散射光( $2\beta - \alpha$ )满足  $(2\beta_1 - \alpha) - (2\beta_2 - \alpha) = 90^\circ$  的关系,这就保证了入射光分裂成两个正交偏振状态。空间相位梯度使得散射光发生异常反射,从而产生无背景散射的出射光束。这些正交分量之间的相位延迟与前述设计[图 11(a)]相同,均是通过控制子单元之间的偏移距离来实现。

利用具有各向异性光学响应的非对称纳米天线也可以实现有四分之一波片功能的超构表面,Zhao 等<sup>[77]</sup>和 Chen 等<sup>[51]</sup>就分别在可见光和近红外区域实现了圆偏振到线偏振的转换。此外,超构表面也用作半波片,实现线偏振光的偏振方向转换<sup>[78-80]</sup>。

超构透镜在偏振成像应用上亦有巨大的优势,组成超构透镜的纳米天线自身即具有偏振相关的特性,保证了高偏振对比度的偏振成像<sup>[10, 13, 81]</sup>。而传统上利用棱镜和波片等光学元件组成的偏振成像系统,不仅设计复杂,而且偏振对比度较低。

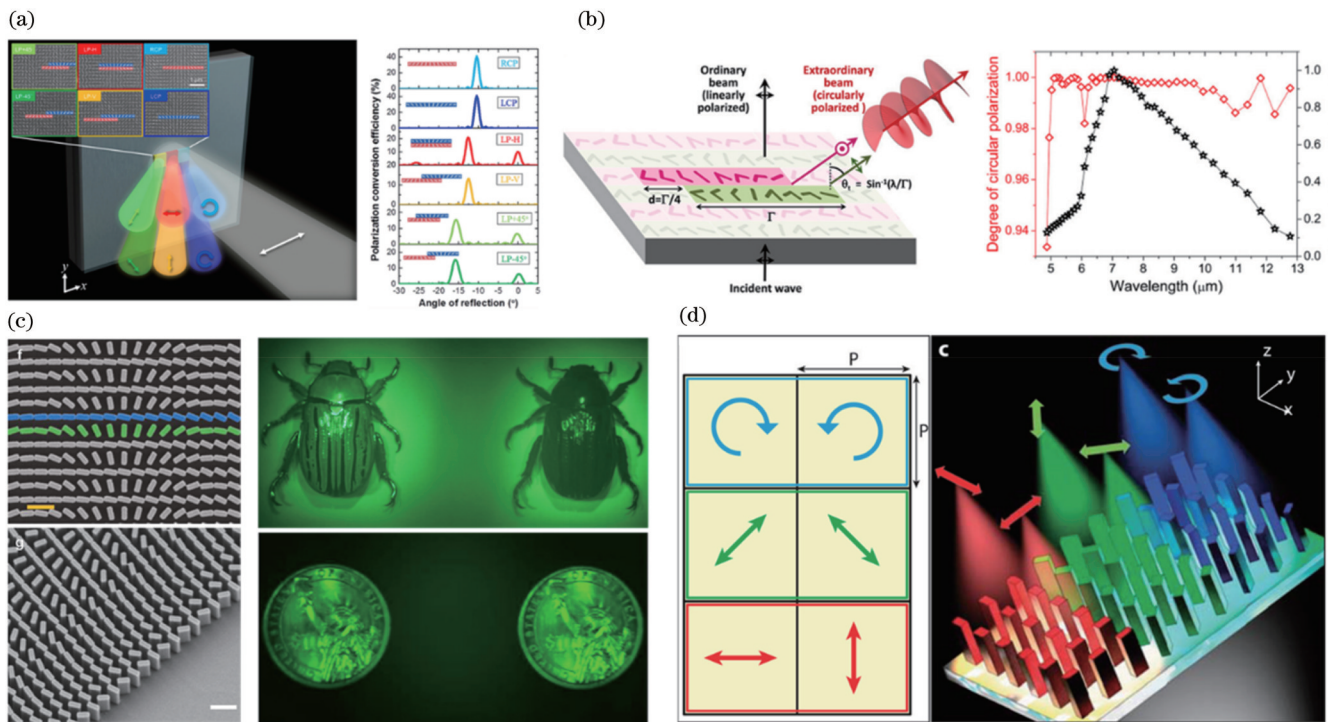


图 11 基于超构表面的偏振产生与成像。(a)产生并分离不同偏振光的超构表面示意图(左)及偏振转换效率图(右)<sup>[13]</sup>;(b)无背景散射光的基于超构表面的四分之一波片图(左)与圆偏度和异常光束强度的全波仿真图<sup>[76]</sup>;(c)多光谱手性超构透镜的俯视和侧视 SEM 图像(左)及彩色相机拍摄的甲虫(上图)和一美元硬币(下图)图像<sup>[82]</sup>;(d)偏振相机像素单元的对应偏振态示意图(左图);三维像素单元将光分割并聚焦不同偏振状态到不同位置(右图)<sup>[87]</sup>

Fig. 11 Metasurface-based polarization generation and imaging. (a) Schematic of metasurface for versatile polarization generation and separation (left) and the simulated conversion efficiency for each polarization (right)<sup>[13]</sup>; (b) diagram of a background-free metasurface-based QWP (left) and full wave simulations of degree of circular polarization and the extraordinary beam intensity (right)<sup>[76]</sup>; (c) left panel: SEM images of the top and side views for multispectral chiral meta-lens; right panel: captured images from color camera of beetle (top) and one-dollar coin (bottom)<sup>[82]</sup>; (d) left panel: schematic of corresponding polarization state on metapixels for the polarization camera; right panel: 3D metapixel splitting and focusing of different polarization states to different positions<sup>[87]</sup>

图 11(c)显示了基于几何相位设计的介质超构透镜,该透镜可以同时捕获同一视场内生物标本的两个光谱分辨图像<sup>[82]</sup>。几何相位是手性敏感的,所以可以仅使用单个超构透镜与相机组成的成像系统,实现在整个可见光谱中探测生物标本的圆形二色性。因此,基于超构表面的偏振光学系统中,允许在一对正交偏振态上施加两个任意且独立的相位分布<sup>[83-86]</sup>。该方法除了几何相位外,同时还利用传播相位进行调制。

图 11(d)展示了一种由 3 个不同的超构透镜组成的小型超构器件。该器件可将光分割并聚焦在图像传感器的 6 个不同像素点上,对应 3 种不同的偏振态<sup>[87]</sup>。该设备可用于捕获复杂偏振物体的图像,因此可用作近红外域的全斯托克斯偏振相机。Yang 等<sup>[88]</sup>使用类似的方法演示了 1550 nm 波长下的广义 Hartmann-Shack 偏振光束分析器的功能,该分析器允许同时测量光束的相位和空间偏振曲线。该超构表面阵列是硅基的,可以使用互补的金属氧化物半导体(CMOS)兼容工艺进行批量生产。Yan 等<sup>[89]</sup>利用全介质超构表面,将实时偏振成像拓展到中红外波长范围。Rubin 等<sup>[90]</sup>则将傅里叶光学的概念拓展到矩阵上,并根据此概念设计了超构表面光栅,实现对任意偏振的分析。

## 4.2 光场成像与感测

光场成像可以获取光场的高维辐射信息。在理想情况下,光场图像可以提供包括物体的位置、速度和光谱信息在内的空间坐标。图 12(a)所示为全彩光场成像系统,其中多维光场信息可通过 GaN 消色差超构透镜阵列获取<sup>[23]</sup>。在传感平面捕获的多幅图像能提供渲染图像中的深度信息,如图 12(a)左图所示。在一定时间范围内获得的深度信息也可以用来计算物体在该范围内的速度。在非相干白光的照射下,利用该阵列系统能对 1951USAF 分辨率测试表进行成像,所成图像能达到约 1.95  $\mu\text{m}$  的衍射极限分辨率,如图 12(a)右图所示<sup>[23]</sup>。

Chen 等<sup>[39]</sup>利用 3600 个消色差透镜组成阵列,设计了一种紧凑的多功能立体视觉系统,实现对 30 cm 范围内的深度测量。如图 12(b)所示,该超构透镜阵列不仅能与上述设计一样,通过收集光场信息来实现深度检测,还可以与光源集成,形成有源光学器件,投射结构光。因此,该器件既可以用于明亮环境下的光场成像系统,也可以用作黑暗环境下的结构光投影器件,实现深度检测。两种方式得到的深度信息都是利用卷积神经网络分析提取的。此外,Guo 等<sup>[91]</sup>受跳蛛利用多层半透明视网膜实现深度感知的启发,设计了一种利用单个超构透镜提取深度的方法。该方法对单个超构透镜进行空间复用,分离透射光,使传感器能在不同区域上同时捕获具有不同焦散的图像,使用少量计算便可从图像中提取深度<sup>[91-92]</sup>。

Fan 等<sup>[93]</sup>利用集成成像捕获和重建了光场信息,该方法的工作流原理与光场相机相反。图 12(c)给出

了集成成像的工作原理图,利用算法对 3D 场景进行编码并在自由空间中重建光学图像。该设计中使用与偏振无关的氮化硅消色差超构透镜阵列实现可见光区域的重建,以渲染三维场景。该超构透镜阵列可以实现衍射极限聚焦和白光集成成像,如图 12(d)所示。

超构透镜阵列还可用于光场边缘成像系统,Chen 等<sup>[94]</sup>利用 60 $\times$ 60 的 GaN 超构透镜阵列实现了 400 nm 到 660 nm 波长范围的边缘检测,如图 12(e)所示。该设计支持一维到三维的边缘检测,能捕获并计算物体的所有光场信息,其中三维边缘检测指的是携带深度信息的二维边缘图像。携带深度信息的边缘图像可通过图像渲染提取。

除以上提到的超构透镜阵列外,单个超构透镜也可用于辅助确定高度。将超构透镜与图像传感器集成,拍摄特定的图案,即可根据图案大小确定深度<sup>[40]</sup>。例如将超构透镜安装在无人机上,拍摄地面上的特定图案 H,即可测出无人机的高度,并将其用于辅助飞行和降落,如图 12(f)所示。由于超构透镜的质量很轻,能显著降低功耗,故很适合作为微纳机器人、微型飞行器的成像组件。

## 4.3 生物医疗成像

对生物体细胞组织进行成像是完成疾病诊断、医药研发和生物学研究等的重要一环。光学超构透镜有望应用到细胞生物学研究、临床治疗等场景中,替代由传统透镜组成的生物组织成像系统和手术设备,实现上述设备的小型化。

光学超构透镜系统可用于内窥镜成像,获取临床上需要的高分辨率光学图像。Pahlevaninezhad 等<sup>[95]</sup>将硅基超构透镜集成到内窥镜光学相干断层扫描(endoscopic OCT)导管中。该光学系统无需复杂的组件排布,便可实现近衍射极限的成像。他们能够使用该内窥镜拍摄果肉的放大图像,从图像中可以很容易地分辨不同细胞,细胞壁结构清晰可见。

超构透镜也可集成到显微镜上,图 13(a)给出了一种集成 GaN 超构透镜的光片荧光显微镜(LSFM)<sup>[96]</sup>。该超构透镜能将入射光聚焦为光片的形式,在物镜光轴方向上提供约 5  $\mu\text{m}$  分辨率的荧光图像。当利用该超构透镜照射被荧光标记的秀丽隐杆线虫(*C. elegans*)时,能得到如图 13(a)中红色虚线框出的荧光图像。由于光片的轴向分辨率较高,拍摄的图像不会受非目标切面细胞的干扰,具有较低的背景噪声,有利于清晰地分辨不同细胞的细胞核。

Luo 等<sup>[97]</sup>提出一种能精准传递光能的方法。该方法利用超构表面产生一种特殊的光束,突然自动聚焦(AAF)光束,如图 13(b)所示。这种光束在经过超构表面与物镜组成的波前调制系统后,在传播过程中一直呈现出圆环状的强度剖面,到达焦平面以后才会突然聚焦。因为光束能实现突然聚焦,故可实现生物组织指定位置的荧光显微分析,而不受非目标组织的影



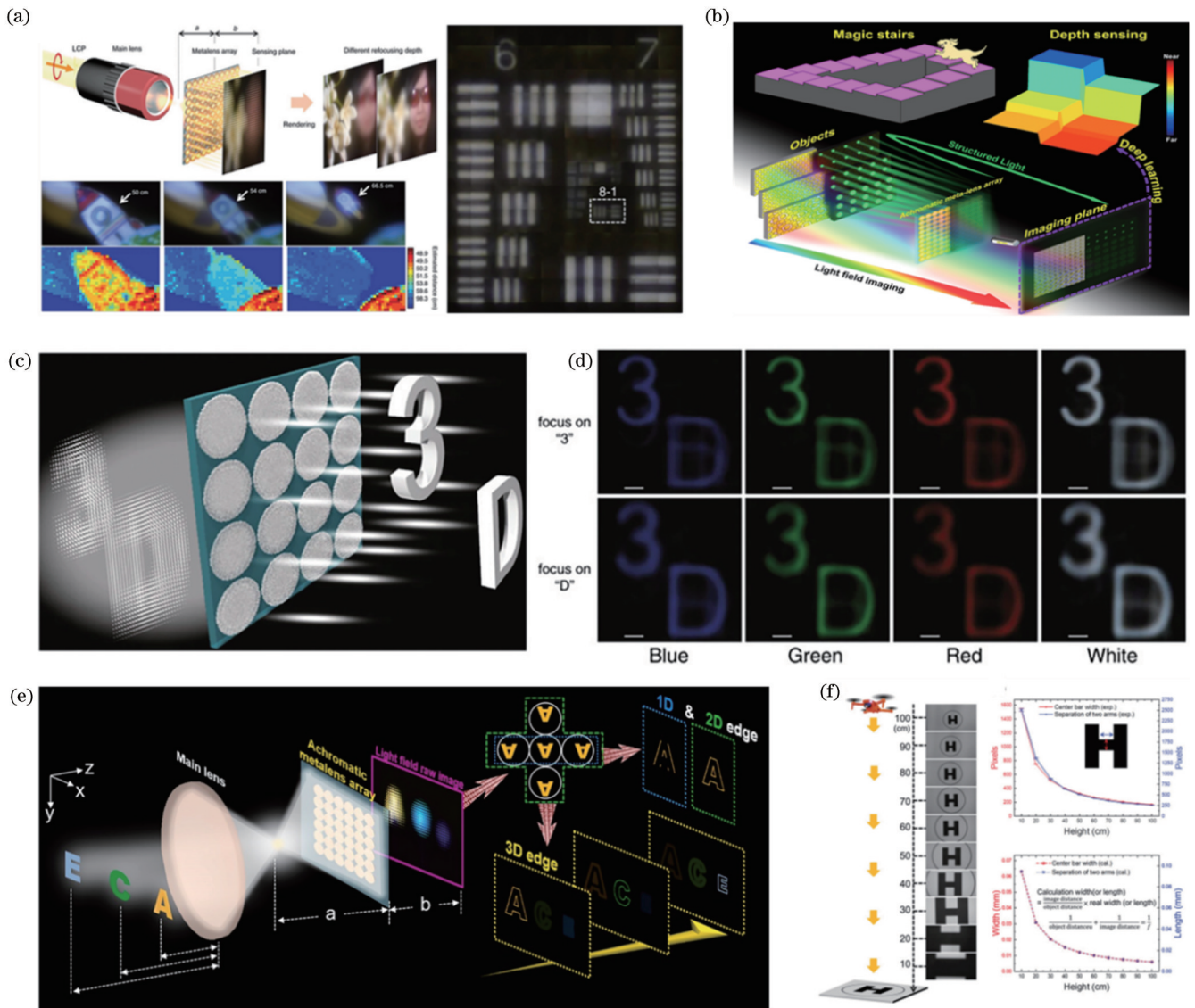


图 12 超构透镜光场成像与感测。(a)左图:光场成像与渲染成像(上),在不同深度的聚焦于火箭的渲染图(中),对应的深度图(下);右图:白光照射下该阵列生成的渲染图像<sup>[23]</sup>;(b)消色差超构透镜阵列组成的深度感知系统<sup>[39]</sup>;(c)白光照射下消色差超构透镜阵列所成的集成图像<sup>[93]</sup>;(d)不同深度平面的重构图像<sup>[93]</sup>;(e)具有多维边缘检测功能的光场成像系统<sup>[94]</sup>;(f)超构透镜组成的航空摄影与降落辅助系统(左),不同高度下的成像的实验(右上)与仿真(右下)结果图<sup>[40]</sup>

Fig. 12 Meta-lens light-field imaging and sensing. (a) Left panel: light-field imaging and rendered images (top), rendered images of rocket at different depths (middle), and estimated depth map (bottom); right panel: rendered image formed by achromatic meta-lens array with incident white light<sup>[23]</sup>; (b) schematic of the depth-sensing system composed of meta-lens array<sup>[39]</sup>; (c) integral imaging given by achromatic meta-lens array at incident white light; (d) reconstructed images with different depth planes<sup>[93]</sup>; (e) schematic of light-field imaging system with multi-dimensional edge detection<sup>[94]</sup>; (f) meta-lens for aerial photography and landing assist system (left), experimental (upper-right) and simulated (bottom-right) imaging properties at different height<sup>[40]</sup>

响。此外,该光束具有递送能量的特性,还可用来实现激光手术。如图 13(c)左图所示,当开始利用 AAF 光束照射小鼠心脏切片时,可以观察到荧光成像及相应的荧光强度分布(蓝线),在持续照射 10 min 以后,该荧光图像消失,且荧光强度(红线)几乎降为 0,这表明该 AAF 光束确实具有定点清除病变组织的能力。

Luo 等<sup>[98]</sup>还设计了一种可变焦的 Moiré 超构透镜,该透镜是一种具有光学切片能力的荧光显微透镜,如图 13(d)所示。该超构透镜由两片相位互补的超构表

面组成,通过旋转超构表面,改变相对角,便可实现 532 nm 波长下从 10 mm 到 125 mm 的连续变焦功能,如图 13(e)所示。当利用该系统对小鼠大肠组织的绒毛进行多次切片的荧光成像时,通过旋转超构表面便能调控聚焦深度,再辅以 HiLo 成像算法,便可提取焦平面位置的荧光图像。该超构透镜还具有远心的配置,以提高荧光成像的对比度。变焦功能也可以利用其他可调方式实现,She 等<sup>[99]</sup>将人造肌肉(介电弹性致动器)与超构透镜相结合,实现了电可调的变焦超构透

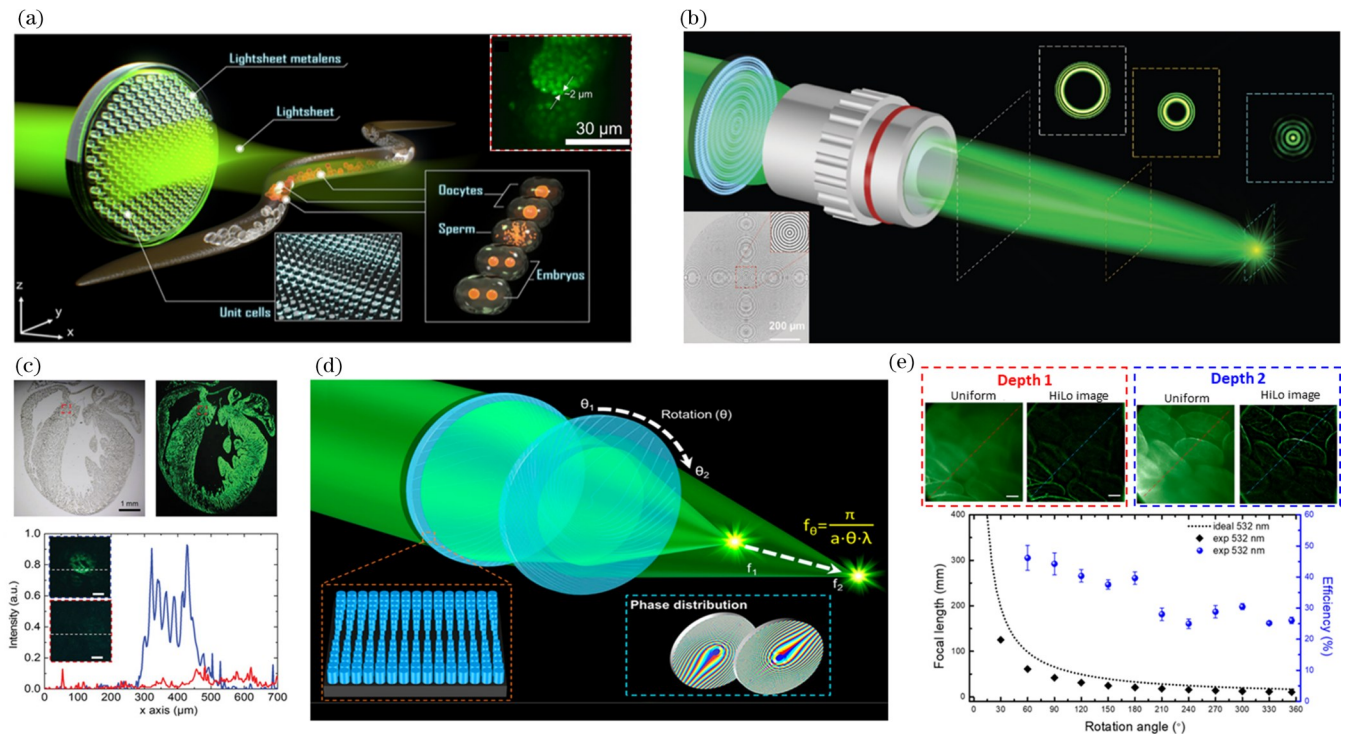


图 13 超构透镜在生物医疗成像领域的应用。(a)光片荧光显微镜示意图与秀丽隐杆线虫的LSFM图像(右上)<sup>[96]</sup>;(b)AAF光束的产生示意图与超构表面的表面相位分布图(左下);(c)荧光标记的小鼠心脏切片的亮场(左上)与宽场(右上)图像,以及红色线框位置的荧光强度分布图(下)<sup>[97]</sup>;(d)Moiré超构透镜示意图;(e)上图:绒毛在不同深度的均匀光照荧光图像与HiLo处理后的图像(右);下图:焦距的实验与仿真结果与效率的测量结果<sup>[98]</sup>

Fig. 13 Application of meta-lens in the field of biomedical imaging. (a) Schematic of light-sheet fluorescence microscopy and LSFM image for *C. elegans* (upper right)<sup>[96]</sup>; (b) schematic of generation of AAF beam and the required phase distribution on metasurface (bottom left); (c) bright-field (upper left) and wide-field (upper right) images of the fluorescence-tagged mouse cardiac slice, the corresponding fluorescence intensity profiles for the red box region (bottom)<sup>[97]</sup>; (d) schematic of Moiré meta-lens; (e) upper panel: fluorescent image of villi under uniform illumination and HiLo processed image (right) of villi; bottom panel: experimental and simulated focal length and measured efficiency<sup>[98]</sup>

镜系统。这样的设计可以应用于全自动工作的光学显微镜系统。

## 5 结论与展望

总结了超构器件的设计流程、加工手段以及在成像上的应用。在超构器件的设计中,需要考虑所选材料的折射率、效率和色散等基本参数,以决定不同光学特性的纳米结构单元所需的几何形状和配置。将这些结构单元存放于数据库中,根据不同需求便可随时取用合适的单元设计,组成功能各异的超构器件,随后进行加工和实验验证。而在超构器件的加工中,应从加工精度、制造面积、制造成本、加工的时间成本、适用的材料范围等角度进行综合考虑,从多种工艺中选取合适的加工方法。最后介绍了超构器件在成像方面的应用。由于许多纳米结构本身便具有各向异性的偏振特性,用超构表面便可以直接实现任意偏振的产生与偏振成像,而不需要复杂的多组件设计。受果蝇等动物的复眼的启发,可以利用多个超构透镜组成阵列,实现光场成像、深度探测及边缘检测等功能。由于超构透镜通常具有极小的尺寸且厚度可忽略不计,即使组成

阵列的形式,整体的尺寸也仍远小于传统透镜,保证超构透镜阵列能在实际中得到应用。此外,超构器件极佳的可设计任意功能器件的特性使其在生物医疗等领域也能占据一席之地。无论是在高分辨率的内窥镜成像,还是具有任意波前特性的荧光显微镜成像中,超构器件都能发挥其作用。

超构器件尽管只有十余年的发展历史,但其远超传统光学器件的调控能力赋予其极大的潜力,许多基于超构器件的功能与应用尚待探索。例如在成像方面,已经出现了利用超构透镜实现宽视场的设计<sup>[100-101]</sup>,但这些设计均需要双层结构的设计才能实现视场的拓宽。在未来也许能基于单层超构透镜实现宽视场的设计。目前已经有大量将超构表面用于非线性光学研究,但大都将研究范围局限于红外和可见光范围之中。在未来可以将这些研究拓展到紫外甚至极紫外波长范围中,实现非线性生成<sup>[102]</sup>、非线性全息<sup>[103-104]</sup>、非线性成像<sup>[105]</sup>等功能。通过将新的物理机制引入超构表面的设计中,如连续体中的束缚态(BICs),可以大幅提高非线性等功能的效率<sup>[106-108]</sup>,并提供高灵敏度的传感器<sup>[44, 109]</sup>。超构器件也可以产生



光涡,有望用于实现轨道角动量复用通信系统<sup>[110-111]</sup>。此外,超构器件也可以用于光的量子态操纵<sup>[47, 112-115]</sup>,在量子计算、量子通信等领域中展现出很大的潜力。

尽管目前已经存在许多纳米精度的加工技术,为满足科学研究与商业应用的需求,实现以上有潜力的应用,我们还需要进一步完善现有技术并开发更先进的加工方法,以实现低成本、高产量、大面积、高重复性及高分辨率的制造。而在超构器件的商业化应用中,直接使用现有的 DUV/EUV 光刻技术来实现超构器件的制造便成为一种可行的方案。如前文所述,超构器件的加工工艺与现有半导体微电子制造的工艺展现出很强的兼容性。当需要对超构器件进行大规模商业化生产时,可以利用现有的 DUV/EUV 光刻技术,在不开发新生产线的情况下,直接调整现有生产线,便可投入对超构器件的大规模生产之中,这大大降低了超构器件的生产门槛,有利于对超构器件的大规模推广,从而开启光学超构器件及平面光学领域的新时代。

#### 参 考 文 献

- [1] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [2] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [3] Hsu W L, Wu P C, Chen J W, et al. Vertical split-ring resonator based anomalous beam steering with high extinction ratio[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11226.
- [4] Wang H C, Bao Z, Tsai H, et al. Perovskite quantum dots and their application in light-emitting diodes[J]. *Small*, 2018, 14(1): 1702433.
- [5] Huang Y W, Chen W T, Tsai W Y, et al. Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3122-3127.
- [6] Chen W T, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 225-230.
- [7] Wang H C, Chu C H, Wu P C, et al. Ultrathin planar cavity metasurfaces[J]. *Small*, 2018, 14(17): 1703920.
- [8] Qu G Y, Yang W H, Song Q H, et al. Reprogrammable meta-hologram for optical encryption[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5484.
- [9] Wang D P, Hwang Y, Dai Y M, et al. Broadband high-efficiency chiral splitters and holograms from dielectric nanoarc metasurfaces[J]. *Small*, 2019, 15(20): e1900483.
- [10] Wu P C, Chen J W, Yin C W, et al. Visible metasurfaces for on-chip polarimetry[J]. *ACS Photonics*, 2017, 5(7): 2568-2573.
- [11] Wu P C, Zhu W M, Shen Z X, et al. Broadband wide-angle multifunctional polarization converter via liquid-metal-based metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(7): 1600938.
- [12] Chen W T, Török P, Foreman M R, et al. Integrated plasmonic metasurfaces for spectropolarimetry[J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(22): 224002.
- [13] Wu P C, Tsai W Y, Chen M K, et al. Versatile polarization generation with an aluminum plasmonic metasurface[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(1): 445-452.
- [14] Tsai W Y, Chung T L, Hsiao H H, et al. Second harmonic light manipulation with vertical split ring resonators[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(7): e1806479.
- [15] Shen K C, Huang Y T, Chung T L, et al. Giant efficiency of visible second-harmonic light by an all-dielectric multiple-quantum-well metasurface[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(6): 064056.
- [16] Semmlinger M, Zhang M, Tseng M L, et al. Generating third harmonic vacuum ultraviolet light with a TiO<sub>2</sub> metasurface[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8972-8978.
- [17] Semmlinger M, Tseng M L, Yang J, et al. Vacuum ultraviolet light-generating metasurface[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(9): 5738-5743.
- [18] Lehr D, Reinhold J, Thiele I, et al. Enhancing second harmonic generation in gold nanoring resonators filled with lithium niobate[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(2): 1025-1030.
- [19] Zhou W, Dridi M, Suh J Y, et al. Lasing action in strongly coupled plasmonic nanocavity arrays[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(7): 506-511.
- [20] Shen K C, Ku C T, Hsieh C, et al. Deep-ultraviolet hyperbolic metacavity laser[J]. *Advanced Materials*, 2017, 30(21): 1706918.
- [21] Sun W Z, Liu Y L, Qu G Y, et al. Lead halide perovskite vortex microlasers[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4862.
- [22] Huang C, Zhang C, Xiao S M, et al. Ultrafast control of vortex microlasers[J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1018-1021.
- [23] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [24] Chen C, Song W G, Chen J W, et al. Spectral tomographic imaging with aplanatic metalens[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 99.
- [25] Li M M, Li S S, Chin L K, et al. Dual-layer achromatic metalens design with an effective Abbe number[J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26041-26055.
- [26] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [27] Chen M K, Chu C H, Lin R J, et al. Optical meta-devices: advances and applications[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SK): SK0801.
- [28] Lin H, Xu Z Q, Cao G Y, et al. Diffraction-limited imaging with monolayer 2D material-based ultrathin flat lenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 137.
- [29] Hsiao H H, Chen Y H, Lin R J, et al. Integrated-resonant resonant unit of metasurfaces for broadband efficiency and phase manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(12): 1800031.
- [30] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [31] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
- [32] Balli F, Sultan M A, Ozdemir A, et al. An ultrabroadband 3D achromatic metalens[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(4): 1259-1264.
- [33] Yang W H, Xiao S M, Song Q H, et al. All-dielectric metasurface for high-performance structural color[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1864.
- [34] Huang Y W, Lee H W H, Sokhoyan R, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(9): 5319-5325.
- [35] Chu C H, Tseng M L, Chen J, et al. Active dielectric metasurface based on phase-change medium[J]. *Laser & Photonics Review*, 2016, 10(6): 986-994.
- [36] Wang Y F, Landreman P, Schoen D, et al. Electrical tuning of phase-change antennas and metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(6): 667-672.
- [37] Akselrod G M, Huang J N, Hoang T B, et al. Large-area

- metasurface perfect absorbers from visible to near-infrared[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(48): 8028-8034.
- [38] Hua X, Wang Y J, Wang S M, et al. Ultra-compact snapshot spectral light-field imaging[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 2732.
- [39] Chen M K, Liu X, Wu Y, et al. A meta-device for intelligent depth perception[J]. *Advanced Materials*, 2022: e2107465.
- [40] Chen M K, Chu C H, Liu X Y, et al. Meta-lens in the sky[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 46552-46557.
- [41] Chen M K, Liu X Y, Sun Y N, et al. Artificial intelligence in meta-optics[J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(19): 15356-15413.
- [42] Fan Y L, Chen M K, Qiu M, et al. Experimental demonstration of genetic algorithm based metalens design for generating side-lobe-suppressed, large depth-of-focus light sheet [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(2): 2100425.
- [43] Shi Y Z, Li Z Y, Liu P Y, et al. On-chip optical detection of viruses: a review[J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(4): 2000150.
- [44] Yesilkoy F, Arvelo E R, Jahani Y, et al. Ultrasensitive hyperspectral imaging and biodetection enabled by dielectric metasurfaces[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(6): 390-396.
- [45] Im H, Lee S H, Wittenberg N J, et al. Template-stripped smooth Ag nanohole arrays with silica shells for surface plasmon resonance biosensing[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(8): 6244-6253.
- [46] Xu B B, Li H M, Gao S L, et al. Metalens-integrated compact imaging devices for wide-field microscopy[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(6): 066004.
- [47] Li L, Liu Z X, Ren X F, et al. Metalens-array-based high-dimensional and multiphoton quantum source[J]. *Science*, 2020, 368(6498): 1487-1490.
- [48] Chen B H, Wu P C, Su V C, et al. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [49] Zhang Z J, Luo J, Song M W, et al. Large-area, broadband and high-efficiency near-infrared linear polarization manipulating metasurface fabricated by orthogonal interference lithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(24): 241904.
- [50] Kim H, Park J, Cho S W, et al. Synthesis and dynamic switching of surface plasmon vortices with plasmonic vortex lens [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(2): 529-536.
- [51] Chen W X, Tymchenko M, Gopalan P, et al. Large-area nanoimprinted colloidal Au nanocrystal-based nanoantennas for ultrathin polarizing plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5254-5260.
- [52] Verre R, Svedendahl M, Länk N O, et al. Directional light extinction and emission in a metasurface of tilted plasmonic nanopillars[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(1): 98-104.
- [53] Lu C, Lipson R H. Interference lithography: a powerful tool for fabricating periodic structures[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(4): 568-580.
- [54] Huang H J, Yu C P, Chang H C, et al. Plasmonic optical properties of a single gold nano-rod[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7132-7139.
- [55] Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2818-2823.
- [56] Chun N E, Chang L C, Ye J H, et al. Proximity effect correction in electron-beam lithography based on computation of critical-development time with swarm intelligence[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2017, 35(5): 051603.
- [57] Chang L C, Chun N E, Ye J H, et al. A comprehensive model for sub-10 nm electron-beam patterning through the short-time and cold development[J]. *Nanotechnology*, 2017, 28(42): 425301.
- [58] Su V C, Chen P H, Lin R M, et al. Suppressed quantum-confined Stark effect in InGaN-based LEDs with nano-sized patterned sapphire substrates[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 30065-30073.
- [59] Ma X L, Pu M B, Li X, et al. A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10365.
- [60] Ni X J, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2807.
- [61] Guo Y H, Yan L S, Pan W, et al. Scattering engineering in continuously shaped metasurface: an approach for electromagnetic illusion[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30154.
- [62] Zheng J, Ye Z C, Sun N L, et al. Highly anisotropic metasurface: a polarized beam splitter and hologram[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6491.
- [63] Jakšić Z, Vasiljević-Radović D, Maksimović M, et al. Nanofabrication of negative refractive index metasurfaces[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4/5/6/7/8/9): 1786-1791.
- [64] Luo J, Zeng B, Wang C T, et al. Fabrication of anisotropically arrayed nano-slots metasurfaces using reflective plasmonic lithography[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(44): 18805-18812.
- [65] Liu L Q, Zhang X H, Zhao Z Y, et al. Batch fabrication of metasurface holograms enabled by plasmonic cavity lithography [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(21): 1700429.
- [66] Makarov S V, Milichko V, Ushakova E V, et al. Multifold emission enhancement in nanoimprinted hybrid perovskite metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(4): 728-735.
- [67] Yao Y H, Wu W. All-dielectric heterogeneous metasurface as an efficient ultra-broadband reflector[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(14): 1700090.
- [68] Yao Y H, Liu H, Wang Y F, et al. Nanoimprint-defined, large-area meta-surfaces for unidirectional optical transmission with superior extinction in the visible-to-infrared range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15362-15372.
- [69] Miyazaki H T, Kasaya T, Oosato H, et al. Ultraviolet-nanoimprinted packaged metasurface thermal emitters for infrared CO<sub>2</sub> sensing[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, 16(3): 035005.
- [70] Zhang G Q, Lan C W, Bian H L, et al. Flexible, all-dielectric metasurface fabricated via nanosphere lithography and its applications in sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 22038-22045.
- [71] Bonod N. Large-scale dielectric metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2015, 14(7): 664-665.
- [72] Nemiroski A, Gonidec M, Fox J M, et al. Engineering shadows to fabricate optical metasurfaces[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(11): 11061-11070.
- [73] Wu Z L, Chen K, Menz R, et al. Tunable multiband metasurfaces by Moiré nanosphere lithography[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(48): 20391-20396.
- [74] Gonidec M, Hamedi M M, Nemiroski A, et al. Fabrication of nonperiodic metasurfaces by microlens projection lithography[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4125-4132.
- [75] Park J S, Zhang S Y, She A L, et al. All-glass, large metalens at visible wavelength using deep-ultraviolet projection lithography[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8673-8682.
- [76] Yu N F, Aieta F, Genevet P, et al. A broadband, background-free quarter-wave plate based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6328-6333.
- [77] Zhao Y, Alù A. Tailoring the dispersion of plasmonic nanorods to realize broadband optical meta-waveplates[J]. *Nano Letters*, 2013, 13(3): 1086-1091.
- [78] Ding F, Wang Z X, He S L, et al. Broadband high-efficiency half-wave plate: a supercell-based plasmonic metasurface approach[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(4): 4111-4119.
- [79] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [80] Shaltout A, Liu J J, Kildishev A, et al. Photonic spin Hall



- effect in gap-plasmon metasurfaces for on-chip chiroptical spectroscopy[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 860-863.
- [81] Hu Y Q, Wang X D, Luo X H, et al. All-dielectric metasurfaces for polarization manipulation: principles and emerging applications[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(12): 3755-3780.
- [82] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, et al. Multispectral chiral imaging with a metalens[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(7): 4595-4600.
- [83] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, et al. Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(11): 937-943.
- [84] Balthasar Mueller J P, Rubin N A, Devlin R C, et al. Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(11): 113901.
- [85] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [86] Fan Q B, Zhu W Q, Liang Y Z, et al. Broadband generation of photonic spin-controlled arbitrary accelerating light beams in the visible[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(2): 1158-1165.
- [87] Arbabi E, Kamali S M, Arbabi A, et al. Full-stokes imaging polarimetry using dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3132-3140.
- [88] Yang Z Y, Wang Z K, Wang Y X, et al. Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4607.
- [89] Yan C, Li X, Pu M B, et al. Midinfrared real-time polarization imaging with all-dielectric metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(16): 161904.
- [90] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. *Science*, 2019, 365(6448): eaax1839.
- [91] Guo Q, Shi Z J, Huang Y W, et al. Compact single-shot metalens depth sensors inspired by eyes of jumping spiders[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(46): 22959-22965.
- [92] Watanabe M, Nayar S K. Rational filters for passive depth from defocus[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1998, 27(3): 203-225.
- [93] Fan Z B, Qiu H Y, Zhang H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 67.
- [94] Chen M K, Yan Y, Liu X Y, et al. Edge detection with metalens: from one dimension to three dimensions[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(14): 3709-3715.
- [95] Pahlevaninezhad H, Khorasaninejad M, Huang Y W, et al. Nano-optic endoscope for high-resolution optical coherence tomography *in vivo*[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(9): 540-547.
- [96] Luo Y, Tseng M L, Vyas S, et al. Meta-lens light-sheet fluorescence microscopy for *in vivo* imaging[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 1949-1959.
- [97] Luo Y, Tseng M L, Vyas S, et al. Metasurface-based abrupt autofocusing beam for biomedical applications[J]. *Small Methods*, 2022, 6(4): e2101228.
- [98] Luo Y, Chu C H, Vyas S, et al. Varifocal metalens for optical sectioning fluorescence microscopy[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(12): 5133-5142.
- [99] She A L, Zhang S Y, Shian S, et al. Adaptive metalenses with simultaneous electrical control of focal length, astigmatism, and shift[J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaap9957.
- [100] Shalaginov M Y, An S S, Yang F, et al. Single-element diffraction-limited fisheye metalens[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(10): 7429-7437.
- [101] Groever B, Chen W T, Capasso F. Meta-lens doublet in the visible region[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(8): 4902-4907.
- [102] Tseng M L, Semmlinger M, Zhang M, et al. Vacuum ultraviolet nonlinear metalens[J]. *Science Advances*, 2022, 8(16): eabn5644.
- [103] Ye W M, Zeuner F, Li X, et al. Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11930.
- [104] Gao Y S, Fan Y B, Wang Y J, et al. Nonlinear holographic all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 8054-8061.
- [105] Wang Y J, Chen Q M, Yang W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5560.
- [106] Koshelev K, Kruk S, Melik-Gaykazyan E, et al. Subwavelength dielectric resonators for nonlinear nanophotonics[J]. *Science*, 2020, 367(6475): 288-292.
- [107] Koshelev K, Lepeshov S, Liu M K, et al. Asymmetric metasurfaces with high-Q resonances governed by bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(19): 193903.
- [108] Campione S, Liu S, Basilio L I, et al. Broken symmetry dielectric resonators for high quality factor fano metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(12): 2362-2367.
- [109] Wang J, Kühne J, Karamanos T, et al. All-dielectric crescent metasurface sensor driven by bound states in the continuum[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(46): 2104652.
- [110] Wang X W, Nie Z Q, Liang Y, et al. Recent advances on optical vortex generation[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1533-1556.
- [111] Tan H Y, Deng J H, Zhao R Z, et al. A free-space orbital angular momentum multiplexing communication system based on a metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(6): 1800278.
- [112] Stav T, Faerman A, Maguid E, et al. Quantum entanglement of the spin and orbital angular momentum of photons using metamaterials[J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1101-1104.
- [113] Wang K, Titchener J G, Kruk S S, et al. Quantum metasurface for multiphoton interference and state reconstruction[J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1104-1108.
- [114] Fan Y B, Liang H, Li J S, et al. Emerging trend in unconventional metasurfaces: from nonlinear, non-Hermitian to nonclassical metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(9): 2872-2890.
- [115] Zhu L X, Liu X, Sain B, et al. A dielectric metasurface optical chip for the generation of cold atoms[J]. *Science Advances*, 2020, 6(31): eabb6667.

# Design, Fabrication, and Imaging of Meta-Devices

Leng Borui<sup>1</sup>, Chen Muku<sup>1,2,3</sup>, Tsai Dinpings<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>*Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;*

<sup>2</sup>*Centre for Biosystems, Neuroscience, and Nanotechnology, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;*

<sup>3</sup>*State Key Laboratory of Terahertz and Millimeter Waves, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China*

## Abstract

**Significance** Meta-devices, the conceptual expansion of metasurfaces composed of sub-wavelength artificial nanostructures, are the advanced optical devices that have drawn much attention in recent years. Compared with traditional bulky optical components, which can shape the electromagnetic fields via gradual phase accumulation through propagation inside the medium, meta-devices provide new degrees of freedom for manipulating the amplitude, phase, and polarization of the incident light at a two-dimensional flat interface. The light-matter interaction in the metasurfaces is achieved in sub-wavelength nanostructures, which endow the metasurfaces with inherent features of compact size. Besides their flat and compact dimension, the main distinctions between metasurfaces and their conventional counterparts are their multifunctionality, tenability, and easy-to-integration. The above unprecedented characteristics give the metasurfaces great potential. Versatile metasurface technologies have been proposed to fulfill the demands for various optical applications. Meta-optics opens a new era of flat optical components.

The design procedures or design flow for meta-devices are of importance to researchers in the field of flat optics. A general design flow facilitates the design, fabrication, and characterization of metasurfaces. By using commercial software to calculate the fundamental parameters for nanostructures with different dimensions and configurations, e. g., dispersion functions, phase, and efficiency, a data library for all the structure designs can be created. Metasurfaces with specified requirements can be built efficiently based on the data library, which thus significantly reduces the design load. Following the fabrication and characterization procedures indicated in the general design flow, one can achieve versatile designs for metasurfaces.

One great advantage of metasurfaces is their compatibility with the semiconductor microelectronics fabrication industry. Lithography, one of the most common nanofabrication technologies in the semiconductor industry, allows the fabrication of metasurfaces with high throughput, fidelity, and low cost. More nanofabrication technologies have been developed and applied to metasurface manufacturing to fulfill the growing demands and special requirements, such as laser-interference lithography, nano-imprint lithography, and micro-sphere projection lithography. Those state-of-art fabrication technologies contribute to academic research and real applications of metasurfaces.

Inspired by the promising features of metasurfaces, a variety of applications based on metasurfaces have been introduced, such as beam steering, meta-hologram, polarization control and analysis, imaging, nonlinear generation, focusing, biomedical applications, and high dimensional quantum entangle light source. Those applications further confirm the remarkable capability of metasurfaces. Still, plenty of possible applications based on metasurfaces have not been explored. In order to point out the possible development of metasurfaces, a summary of existing metasurface design and fabrication methods is required.

**Progress** This review focus on the advances in meta-devices. The general design flow for meta-devices is introduced (Fig. 2). An example, the continuous broadband achromatic meta-lens, is demonstrated step by step to facilitate readers' understanding (Fig. 3). The nanofabrication technologies for optical metasurfaces are discussed. The fabrication methods for passive metasurfaces can be generally divided into three categories: direct-write lithography (Table 1), pattern-transfer lithography (Table 2), and hybrid patterning lithography (Table 3). Direct-write lithography is free from converging lens and photomask damage and has high resolution. High cost and time consumption are its main problems. Pattern-transfer lithography shows the merit of high throughput but only can produce limited patterns. Hybrid patterning lithography is capable of making large-area patterns, but it is difficult to make uniform patterns. Meta-devices for imaging have been well studied in recent years. The polarization generation and imaging based on metasurfaces are demonstrated. Inspired by the natural structure of compound eyes, an array of meta-lens, a lens based on metasurfaces, is proposed to achieve light-field imaging and detection. Meta-devices for bio-imaging are also discussed. Finally, a summary and the future prospects of meta-devices are provided.



**Conclusions and Prospects** Metasurfaces and meta-devices are optical components that have emerged in recent years. Their unprecedented ability to manipulate light on a sub-wavelength scale gains a lot of attention from the research community. Benefiting from the compatibility with semiconductor microelectronics fabrication technology, versatile meta-devices can be realized with high throughput and low cost. We believe that more advanced optical meta-devices will be raised by the research community and bring flat optics into our daily life in the future.

**Key words** optical design; meta-device; metasurface; nanofabrication; optical imaging