

超透镜在显微成像中的进展： 设计、加工及应用(特邀)

闫超¹, 胡思怡^{2**}, 顾波波^{1*}

¹上海交通大学生物医学工程学院 Med-X 研究院, 上海 200030;

²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

摘要 超透镜作为一种二维超表面结构最近十多年来得到了广泛的关注。与传统光学透镜相比,超透镜具有超薄和超轻的结构特性以及高度灵活的设计和调控能力,因此,其在推动光学系统向小型化发展过程中扮演着不可或缺的角色。在显微成像技术中,超透镜又提供了多维度的探索视角,展示了其巨大的发展空间。本文全面回顾了超透镜在显微成像技术的最新进展。首先,详细解释了超透镜的波前调控原理,并总结了超透镜主流的设计方法;其次,介绍了超透镜的加工技术;最后,深入探讨了超透镜在光片荧光显微镜、双光子荧光显微镜和内窥镜等显微成像技术中的应用和研究进展。

关键词 超透镜; 超表面; 显微成像; 相位调制

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232584

Advances in Microscopic Imaging with Metalenses: Design, Fabrication, and Applications (Invited)

Yan Chao¹, Hu Siyi^{2**}, Gu Bobo^{1*}

¹Med-X Research Institute and School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200030, China;

²Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences,
Suzhou 215163, Jiangsu, China

Abstract Metalens, a two-dimensional metasurface structure, has attracted widespread attention in the last decade. Compared with conventional optical lenses, metalenses are featured with ultra-thinness and ultra-lightness, as well as multifunctional design and modulation capabilities. Thus, they play an indispensable role in promoting the development of optical systems to miniaturization. In microscopic imaging technology, metalenses provide a multidimensional perspective, which demonstrates their great potential in innovation. In this paper, the recent progress of superlensing in microimaging technology is comprehensively reviewed. First, the wavefront modulation principle of metalens is elaborately explained and the design method of metalens is summarized. Second, the main fabrication techniques of metalens are introduced. Finally, the applications and research progress of metalens in microscopic imaging technologies are insightfully reviewed, such as light-sheet fluorescence microscopy, two-photon fluorescence microscopy, and endoscopy.

Key words metalens; metasurface; microscopic imaging; phase modulation

1 引言

光学成像技术是观察微观物体的最常用技术,在过去几十年中发展了激光扫描共聚焦显微镜^[1-3]、光片荧光显微镜^[4-6]、相差显微镜^[7-9]等成像技术。透镜作为折射型光学元件,依靠入射光在传播时的相位累计实

现对波前的调控,在传统光学系统中仍占据主要地位。然而,由于透镜材料的折射率有限,要想成像质量较高,光学系统的体积往往很庞大,因此不利于系统的轻量化和集成化。此外,单个透镜往往无法解决轴上像差和色差的难题,通常需要通过引入额外镜组来提升系统整体成像质量,这就不可避免地增加了系统的

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2023-11-26; 录用日期: 2023-11-26; 网络首发日期: 2023-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(62375169)、科技部重点研发项目(2021YFF0502900)、上海交通大学(YG2022ZD005)

通信作者: *bobogu@sjtu.edu.cn; **husiyi@sibet.ac.cn

成本和复杂度。

近年来,微纳加工技术蓬勃兴起,便携式、轻小型和高性能光学产品涌现,光学系统小型化得到领域内研究人员的密切关注^[10]。超表面是一种具有特殊结构排列的二维平面光学元件,具有体积小、质量轻、易集成等优点,通过设计任意的相位函数来排布表面纳米单元,开拓了波前调控的新自由度,可以实现光场聚焦^[11-12]、相位调制^[13-14]、偏振调控^[15-16]和全息等^[17-19],其独特的调控特性能够解决传统光学所遇到的难题,使得光学系统小型化成可能。

超透镜作为最具代表性的超表面,通过对轴向光束添加不同相移,实现平面波到球面波的转化。超透镜在尺寸上具有超薄结构特性,在功能上具有高度灵活性,可以实现大数值孔径^[20-21]、宽带消色差^[22-23]和三维成像^[24-25]等,在光学成像这一领域具有巨大的创新潜力。

本文回顾了超透镜在显微成像领域的应用,主要分为 4 个部分:首先介绍了超透镜的设计原理;其次对现有加工超透镜技术特点进行总结;然后讨论了超透镜在显微成像系统中的应用;最后,总结了超透镜的发展现状,并展望了超透镜未来在成像领域的发展。

2 超透镜的设计原理

透镜要实现在特定位置的光束聚集,从波动光学角度解释为经过透镜后表面的任意光线到焦点的光程相等。光程在数值上等于光传播时经过介质的折射率与光在相应介质中传播的几何路径的乘积。根据惠更斯原理^[26],光在介质中传播时,波前是由无数个点的球面子波叠加而成的。当平面波入射到超透镜表面时,经过亚波长单元附加的额外相移调制为球面波,从而实现光束的会聚,代替了传统的光程累加。因此,如图 1 所示,理想会聚球面子波的半径 $R(r)$ 可以表示为 $R(r) = \sqrt{r^2 + f^2} - f$, 其中, f 是超透镜的焦距,在任一点处的相位延迟可以表示为 $\varphi(r) = -kR(r)$, 其中, k 为光在传输介质中的波矢大小。因此,超透镜在极坐标系下的相位分布可以表示为

$$\varphi(r) = -\frac{2\pi n_d}{\lambda} (\sqrt{r^2 + f^2} - f), \quad (1)$$

式中: r 是任意点到超透镜中心点的距离; λ 为设计波长; n_d 为光在传播时介质的折射率。此外,还可以根据

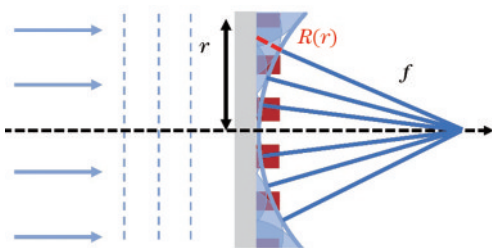


图 1 平面波经过超透镜调制为球面波

Fig. 1 Plane wave modulated into spherical wave

实际应用需求来优化超透镜的相位分布,进一步实现像差矫正^[27-29]、色散调控^[30-31]和光束整形^[32-34]等。

超透镜的设计依赖纳米结构单元的相位延迟,目前超透镜的设计思路可以分为 3 种:共振相位调制、几何相位调制和传播相位调制。

2.1 共振相位调制

当电磁波入射到亚波长金属单元结构表面且入射波频率与金属表面自由电子的振动频率相匹配时会发生谐振效应,通过改变共振频率可实现相位调控^[35]。2011 年,哈佛大学 Capasso 课题组^[36]提出并证明了广义反射和折射定律,图 2(a)为该课题组设计的 8 种 V 形天线结构,通过扫描臂长和夹角两个参数来改变相位增量,实现 $0 \sim 2\pi$ 相位覆盖的阵列。将这些 V 形金属天线作为共振结构,通过改变其几何形状来调控波前。2012 年,复旦大学周磊课题组^[37]设计并构建了 H 形共振超表面,从理论和实验上证明了其在微波区域可实现表面波和传输波的转换,未来可用于表面等离子体耦合器、抗反射表面、光吸收器等领域,如图 2(b)所示。

金属材料在共振调制中会吸收大部分能量,从而导致调制效率低,为了降低损耗,研究人员将目光转向电介质材料。2015 年,Arseniy 课题组^[38]设计了一种硅介质材料组成的超表面,其在可见光波段下透射率接近。图 2(c)为硅纳米阵列结构,通过同时激发电偶极子与磁偶极子共振场产生共振重叠,对入射光的相位引起 2π 的相移。当半径从 115 nm 变化到 155 nm 时,透射光的相位变化在 2π 范围内。2019 年,韩焯课题组^[39]指出在一定高度的超表面结构下,从法布里-珀罗 (F-P) 共振到米氏 (Mie) 共振的跃迁随周期的增加而变化。图 2(d)揭示了 2π 相移随波长和周期变化的机制(红色、绿色、蓝色区域)。

2.2 几何相位调制

几何相位最早由 Pancharatnam^[40]提出,在 1984 年又由 Berry^[41]扩展到今天的形式。1984 年, Berry 发现圆偏光经过纳米结构时,部分偏振光会转化成反向旋转的圆偏振光,同时会附加一个额外的相移,相移由结构的旋转角决定。因此,几何相位也常叫作 Pancharatnam-Berry (PB) 相位。通过庞加莱球可以更直观地描述, PB 相位是庞加莱球上一点到另一点之间路径引入的额外相位差,这个差值只取决于庞加莱球上的各向异性结构的旋向,数值上等于结构旋转角度的两倍。因此,几何相位调制的原理可以通过改变纳米单元结构的尺寸和 $0 \sim \pi$ 的旋向,实现 2π 相位覆盖的调制^[42-45]。图 3(a)为庞加莱球的几何相位示意图^[40]。2012 年, Chen 等^[46]利用矩形纳米单元设计了在可见光波长下的等离子体超透镜,其结构如图 3(b)所示,成功观察到超透镜的聚焦效果。2016 年, Capasso 课题组^[47]利用几何相位设计并加工二氧化钛超透镜,实现在 405 nm、532 nm 和 660 nm 波长下的聚焦成像,其单元结构示意图、超透镜及其 SEM 图像如图 3(c)所示,

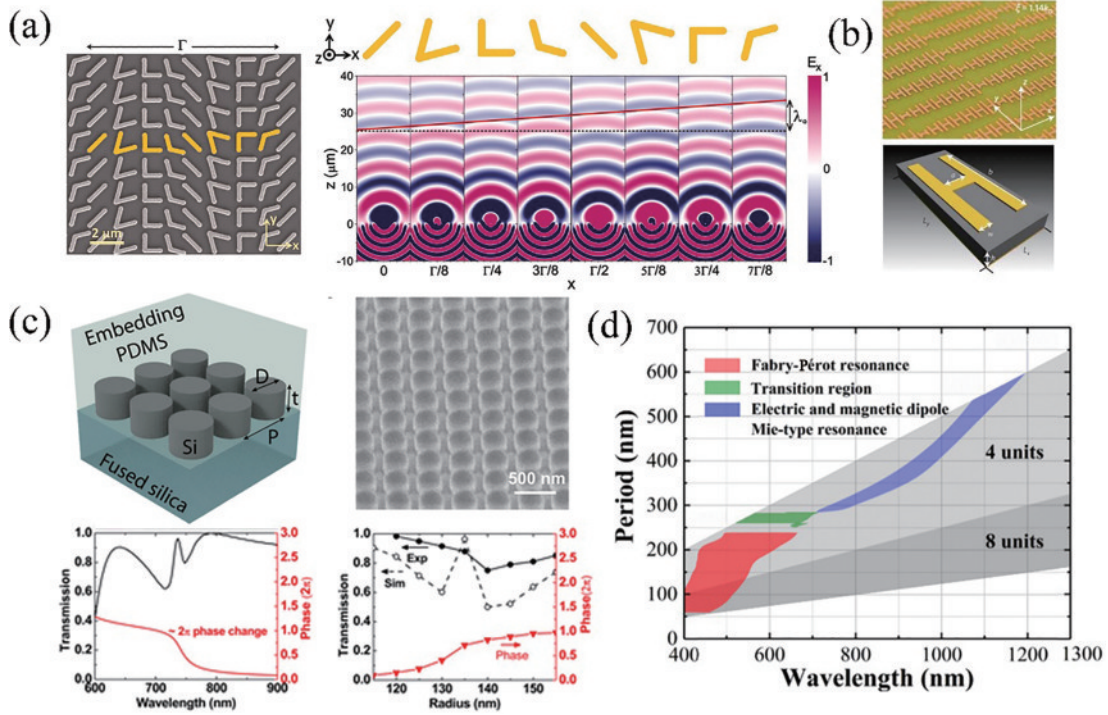


图 2 共振相位调制超透镜。(a)V形超表面阵列及其仿真结果^[36];(b)H形超表面单元结构及其阵列示意图^[37];(c)F-P共振超表面示意图及其单元结构的透过率和相位关于波长和半径的函数^[38];(d)利用共振超表面实现F-P共振和Mie共振^[39]

Fig. 2 Resonant phase modulation of metalens. (a) V-shaped metasurface array and its simulation results^[36]; (b) H-shaped metasurface unit structure and its array schematic^[37]; (c) F-P resonant metasurface schematic and its unit structure transmittance and phase as a function of wavelength and radius^[38]; (d) F-P resonance and Mie resonance achieved by using resonant metasurfaces^[39]

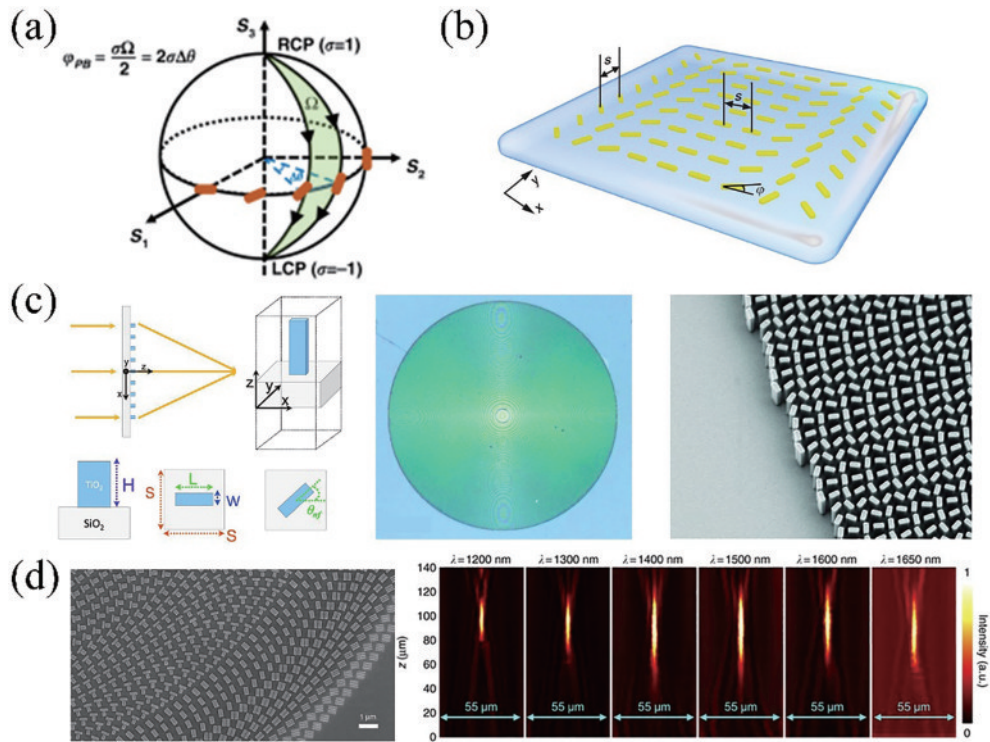


图 3 几何相位调制超透镜。(a)庞加莱球的几何相位示意图^[40];(b)金属矩形纳米单元超表面示意图^[46];(c)二氧化钛单元结构示意图、二氧化钛超透镜及其SEM图像^[47];(d)消色差超透镜的SEM图像和消色差聚焦效果^[48]

Fig. 3 Geometrical phase modulation of metalens. (a) Schematic of the geometrical phase of the Poincaré sphere^[40]; (b) schematic of the metalens of the metal rectangular nanounit^[46]; (c) schematic of the titanium dioxide unit structure, titanium dioxide metalens, and its SEM image^[47]; (d) SEM image of the achromatic metalens and the achromatic focusing result^[48]

该超透镜能够提供 170 倍的放大倍率,可实现亚波长的分辨率。2017 年,祝世宁课题组^[48]通过几何相位结合谐振单元的相位补偿,证明了超透镜在近红外波段(1200~1680 nm)的消色差能力,推动了消色差在超透镜中的发展。图 3(d)为消色差超透镜在 SEM 下的图像和对不同波段的聚焦效果。

2.3 传播相位调制

利用共振相位和几何相位设计的金属超表面在调制时损耗较大,往往导致工作效率较低。研究者们转变思路,研究如何以介质型波导作为超透镜材料,例如硅^[49]、氮化镓^[50]、二氧化钛^[51]和氮化硅^[52]等。这种结构的高度设计在波长量级,光可以在高深宽比的介质中传播累计相位从而产生相位调制,其累计的相位可以表示为

$$\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{\text{eff}} h, \quad (2)$$

式中: n_{eff} 为有效折射率; h 为传播距离即结构高度。

传播相位调制设计的纳米单元结构高度相同,通

过调节纳米结构的尺寸或者占空比来实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位覆盖。此外,有时需要改变结构的高度或者材料折射率以满足足够的相位累计,例如在可见光波段通常选用折射率较低的氮化镓或二氧化钛,在近红外波段选用较高折射率的硅。2016 年, Capasso 课题组^[53]利用二氧化钛纳米柱设计了偏振不敏感超透镜,图 4(a)、(c)为单元结构与超透镜的 SEM 图像和示意图,图 4(d)、(e)为圆柱尺寸与波长的相位分布函数。在可见光(405 nm、532 nm、660 nm)波段分别设计了数值孔径为 0.6 和 0.85 的超透镜,其聚焦效率分别高达 90% 和 60%,图 4(b)分别展示了设计波长为 405 nm、532 nm 和 660 nm 超透镜的聚焦效果。2021 年,肖淑敏课题组^[51]实验展示了在近红外波段的偏振不敏感消色差超透镜,超透镜的二氧化钛纳米结构深宽比高达 30:1,超透镜的 SEM 图像如图 4(f)所示。在 650~1000 nm 的波段内的平均聚焦效率为 88%,图 4(g)、(h)分别为不同入射波长和偏振态下的聚焦效率。

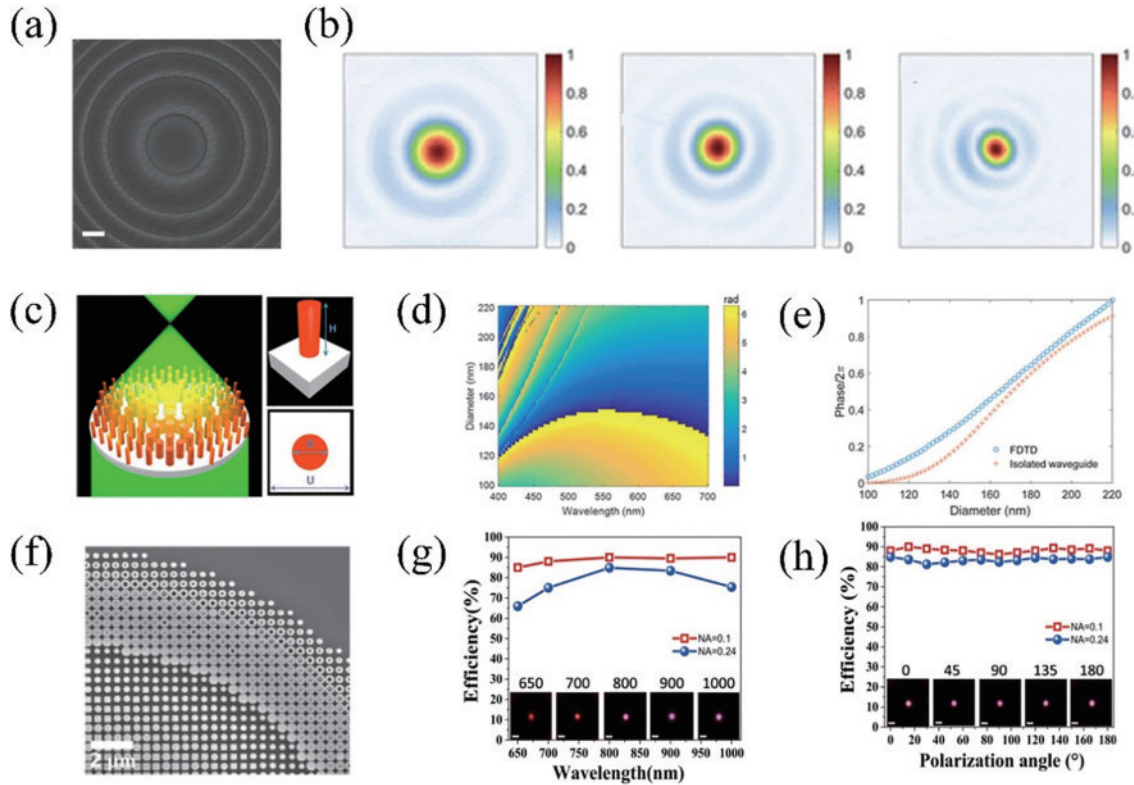


图 4 传播相位调制超透镜。(a)二氧化钛超透镜 SEM 图像^[53]; (b)设计波长分别为 405 nm、532 nm 和 660 nm 超透镜的聚焦效果^[53]; (c)超透镜及纳米单元结构示意图^[53]; (d)(e)圆柱尺寸与波长的相位分布函数^[53]; (f)消色差超透镜 SEM 的图像^[51]; (g)(h)不同入射波长和偏振态的聚焦效率^[51]

Fig. 4 Propagation phase modulation of metalens. (a) SEM image of titanium dioxide metalens^[53]; (b) focusing results at 405 nm, 532 nm, and 660 nm wavelengths^[53]; (c) schematic diagram of the structure of the metalens and nanorods^[53]; (d)(e) phase distribution function of the cylindrical size with wavelengths^[53]; (f) SEM image of the achromatic metalens^[51]; (g)(h) focusing efficiency of different incident wavelengths and polarization states^[51]

在超表面的 3 种相位调制模式中:使用金属材料的共振超透镜常用于长波的聚焦和偏振转化等功能性调制中;而使用电介质材料的共振调制降低了材料引起的能量损耗,可用于聚焦成像,但这种超透镜只能在

相对较窄的带宽内工作,并且在相位梯度较大的情况下,相邻纳米结构单元之间的模式耦合也会导致误差,从而降低聚焦性能;几何相位通过改变表面纳米单元的旋角调控波前,可以实现宽带成像,但这类超透镜具

有偏振依赖性,当非圆偏振光入射时,能量利用率降低,实验中需要先在光学系统中调制入射光的偏振态,因此限制了实际应用。基于传播相位调制的超透镜通常是各向同性的,具有较高的聚焦效率和成像分辨率。然而,其不足主要集中在超透镜的加工方面,使用低折射率材料时需要较高的纳米单元才能满足相位覆盖,这使高深宽比结构的加工成为了新的挑战。

3 超透镜的加工

3.1 光刻

光刻是一种以激光为工具,通过物理和化学方法将特定的掩模图案转移到介质层上的工艺,具体可以分为曝光和刻蚀两部分。

在晶圆或介质层基底上涂布均匀厚度的光刻胶,将预制的掩模版与其校准对齐,经过激光照射,曝光后的光刻胶发生化学反应,通过显影定形去除多余的光刻胶形成相应的掩模图案。接下来将光刻得到的图案经刻蚀技术转移到基底上获得一致微纳图案。光刻工艺通常包括晶圆清洗烘干、涂胶、旋胶、前烘、对准曝光、后烘、显影、坚膜、刻蚀、去胶等多个环节。图 5(a)展示了光刻工艺的流程。

光刻技术的优势在于分辨率高,能精确地控制曝光图案的形态与大小,是目前世界上最重要的集成电路工艺之一,也是现代电子工业发展中必不可少的加

工方法,已经广泛应用于微纳器件加工^[54]、光学^[55]、生物医学^[56]等领域。随着技术要求不断提高,传统光刻技术也存在一定局限性。由于曝光波长直接决定了光刻系统的分辨率,传统光刻技术无法满足纳米结构所需的更高的分辨率。此外,传统光刻技术还受到高成本的设备、严苛的使用环境,以及适宜的材料等因素制约。面对传统光刻技术存在的局限,新兴光刻技术应运而生,如极紫外光刻^[57]、电子束光刻^[58]、纳米压印光刻^[59]和激光直写技术^[60]等,在更短波长或聚焦电子束更小的情况下,实现了更高分辨率。极紫外光刻采用波长为 10~14 nm 的极紫外光作为光源,因此可以提供极高的分辨率,能够加工更小尺寸纳米结构。除此之外,还改进了一些技术方法,扩大了光刻机的加工尺寸,从而能够满足更大尺寸晶圆的生产需求。这些创新技术的进步为微纳制造带来了更高的制造精度和效率,以及多样化的加工手段。顾远东课题组^[55]使用 193 nm 深紫外浸没光刻和电感耦合等离子体刻蚀工艺制造出了显示红色、绿色和蓝色的非晶硅超表面。图 5(b)分别显示了制备的 12 inch (1 inch=2.54 cm) 晶圆照片和非晶硅纳米柱阵列的 SEM 图像。庄松林课题组^[61]利用光刻和深度蚀刻工艺制造了工作频率在 0.3~0.8 THz 范围的宽带消色差超透镜。图 5(c)为超透镜示意图以及纳米柱的 SEM 图像。

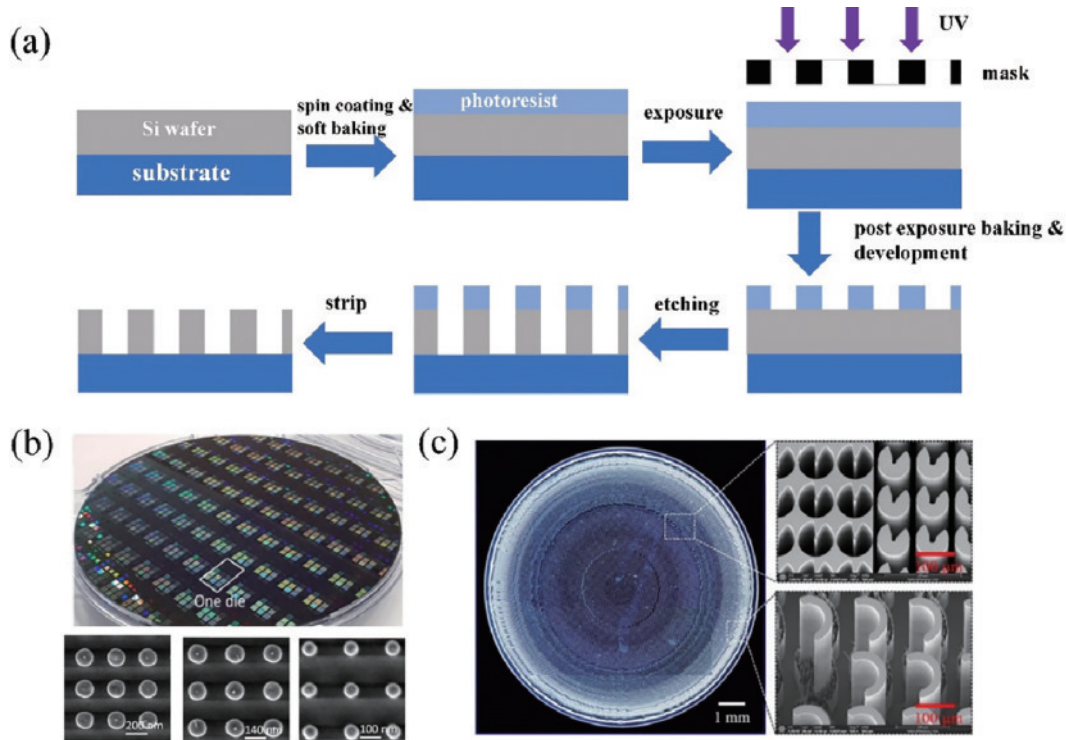


图 5 光刻。(a)光刻工艺流程;(b)制造的 12 英寸晶圆的照片和非晶硅纳米柱阵列的 SEM 照片^[55];(c)宽带消色差超透镜在显微镜下的图像以及纳米柱的 SEM 图像^[61]

Fig. 5 Photolithography. (a) Photolithography procedure; (b) photographs of fabricated 12-inch wafers and SEM photographs of amorphous silicon nanopillar arrays^[55]; (c) broadband achromatic metalens under microscope images and SEM images of nanopillars^[61]

3.2 电子束光刻

电子束光刻(EBL)通过操控电子束的聚焦和定位直接对衬底表面的光刻胶进行曝光^[62-63]。电子束本质上是带电粒子,根据波粒二象性理论可知其波长 λ_e ^[64]为

$$\lambda_e = \frac{1.226}{\sqrt{V}}, \quad (3)$$

式中, V 为加速电压。由此可知,电子束的加速电压越高,电子束波长越小,从而实现高分辨的加工,在100 kV的加速电压下,电子束波长为0.12 nm。相比于传统的光刻技术,EBL无需掩模图案,简单灵活,图6(a)展示了EBL工艺流程图。

Manfrinato等^[65]使用像差校正的扫描透射电子显微镜进行光刻,实现了小于5 nm线宽的AuPd线结构。由于EBL是一种无掩模式光刻,具有成本低、工艺简单、可批量生产等优点,在纳米光子学、超导、量子点和超透镜等领域有广泛的应用。陈献忠课题组^[66]利用EBL技术以及薄膜沉积和剥离工艺制造出金纳米柱组成的超透镜,能产生特定偏振的聚焦曲线,如图6(b)所示。Kuznetsov课题组^[67]利用PECVD工艺制备250 nm非晶硅薄膜,然后使用单步EBL进行光刻,最后经过反应离子刻蚀制备得到大数值孔径(>0.99)的超透镜,如图6(c)所示,实现了在715 nm的非偏振光成像。

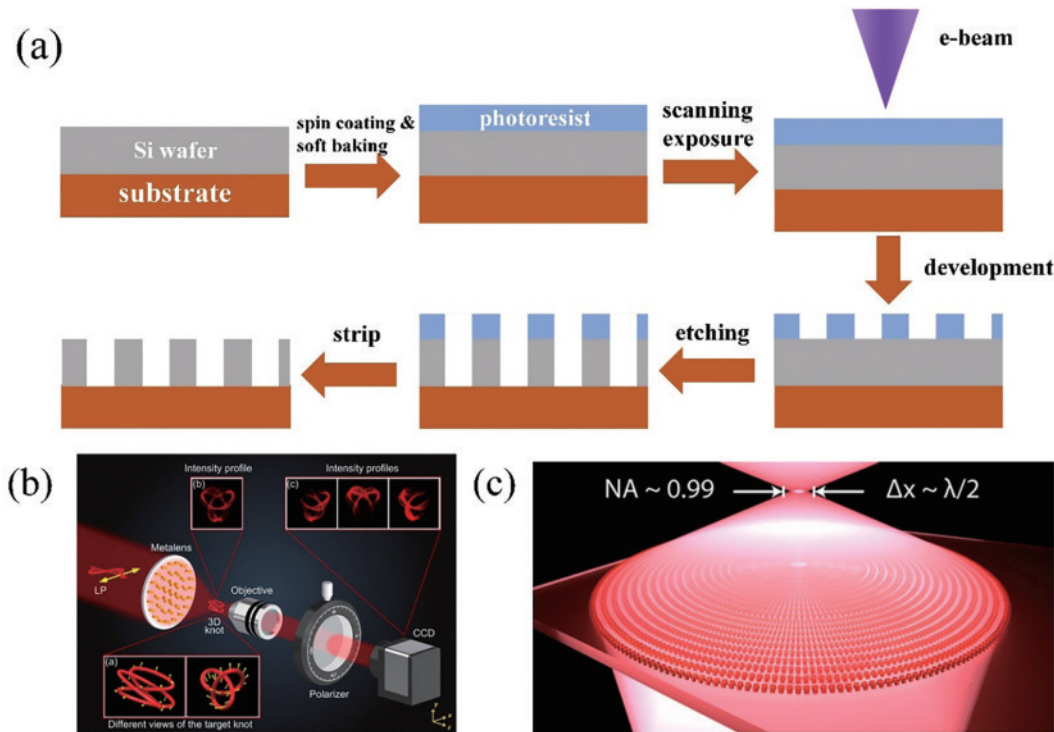


图6 电子束光刻。(a)EBL工艺流程;(b)超透镜产生三维聚焦曲线的示意图^[66];(c)利用EBL制造的大NA超透镜^[67]
Fig. 6 Electron beam lithography. (a) EBL process sequence; (b) schematic diagram of generating a 3D focusing curves with metalens^[66]; (c) large NA metalens fabricated by using EBL^[67]

3.3 纳米压印光刻

纳米压印光刻技术(NIL)本质上是利用压印模板将图案转移到薄膜材料表面,用于制造纳米级图案和结构,主要包括冲压、脱模和刻蚀。

NIL能够实现高分辨率的纳米结构制造,不需要曝光系统、成本低、效率高、均匀性、重复性好,能够大批量加工微纳结构,NIL广泛应用于集成电路^[68]、生物传感^[69]和微纳光子学^[59,70]等领域的纳米器件制备。Lee课题组^[59]提出一种新型的湿法刻蚀NIL技术制备高深宽比的超透镜,该工作采用水溶性模具,避免了剥离时压印模具对纳米结构施加的应力,图7(a)为湿法刻蚀NIL的步骤示意图以及超透镜SEM的图像。Yoon等^[71]研发了一种纳米复合材料用于紫外纳米压印的超透镜制备,图7(b)为超透镜加工流程图,该方

法在保证超透镜聚焦效率和成像特性的同时降低了超透镜制造成本。Genevet课题组^[72]通过结合NIL和晶体材料纳米结构技术(SAS)避免刻蚀工艺对纳米结构的不可逆损坏,实现了大面积、并行、高分辨率的光刻,可制备厘米级氮化镓超透镜。图7(c)分别为反应离子刻蚀(左)和SAS加工(右)的纳米柱形貌的SEM图像,这一技术与反应离子刻蚀相比,减小了表面粗糙度和缺陷,可对纳米结构形貌进行更好的控制,适用于超透镜的大规模生产和高成品率制造。

随着超透镜的应用范围不断扩大,如何实现大尺寸超透镜的加工成为了一个新的挑战。3种加工技术的参数比较如表1所示。紫外光刻作为常见的光刻技术,分辨率受限于曝光波长的大小,比如深紫外、极紫外光刻等,分辨率通常在几十纳米至几百纳米的范围

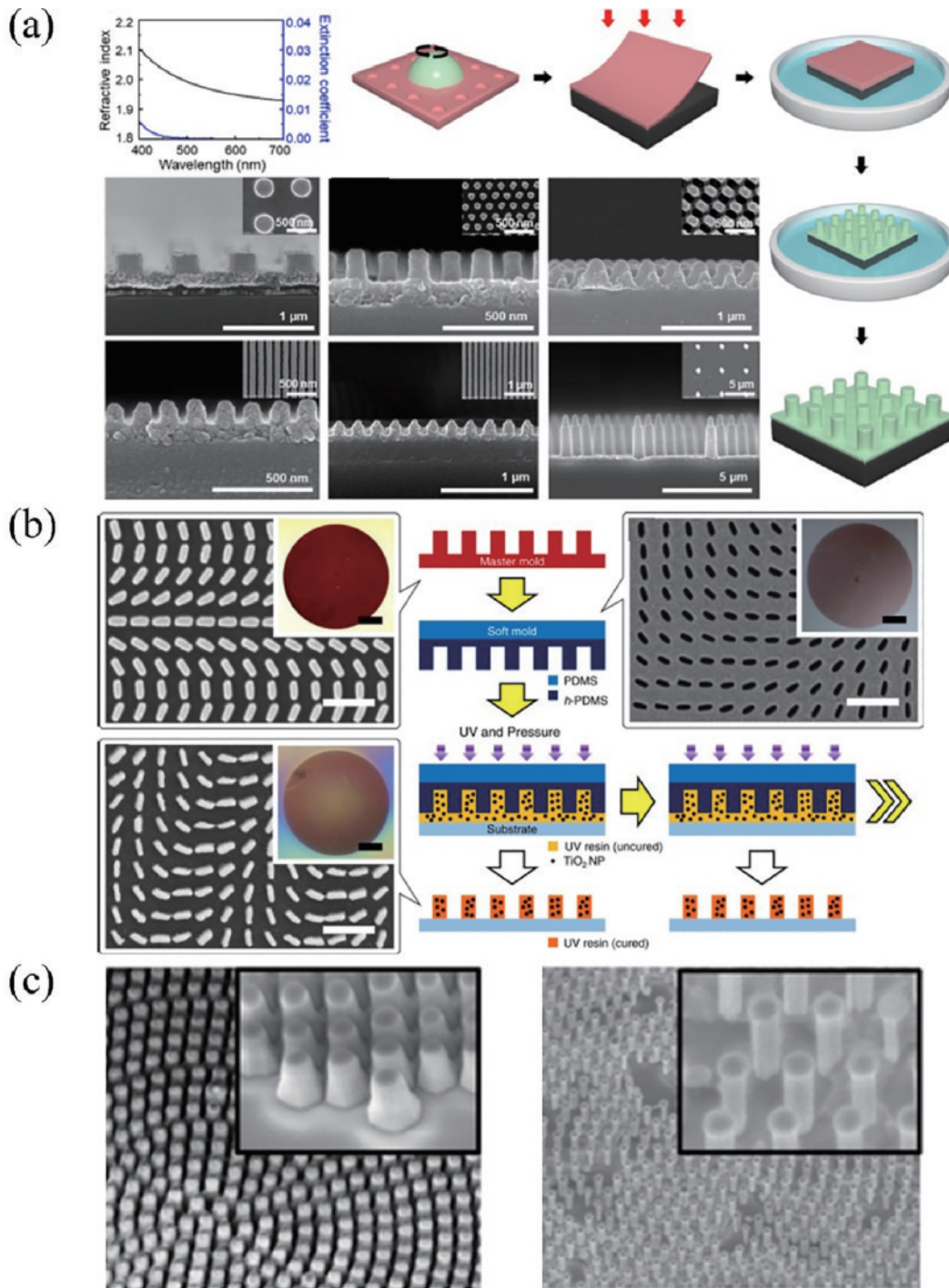


图7 纳米压印光刻。(a)湿法刻蚀NIL的步骤示意图以及超透镜SEM的图像^[59];(b)紫外纳米压印的超透镜制备流程^[71];(c)反应离子刻蚀(左)和SAS加工(右)的纳米柱形貌的SEM图像^[72]

Fig. 7 Nanoimprint lithography. (a) Schematic of wet etching and SEM images of metalens^[59]; (b) fabrication process of UV nanoimprinting^[71]; (c) SEM images of nanopillar morphology of reactive ion etching (left) and SAS processing (right)^[72]

表1 光刻技术参数对比表

Table 1 Comparison table of lithography technical parameters

Parameter	Ultraviolet lithography	Electron beam lithography	Nanoimprint lithography
Resolution	10–500 nm	1–10 nm	10–500 nm
Speed	Rapid	Slow	Fast
Cost	Moderate	High	High
Application	Integrated circuits	Nanofabrication	Biosensors

内,常用于半导体和集成电路制造,成本较低。EBL采用电子束曝光,极大地提升了光刻的分辨率,可达几纳米甚至更小,因此设备和维护成本也相对较高。由于EBL曝光需要逐点扫描,加工速度较慢,适用于高精度微纳米结构制造^[65]。NIL的分辨率主要取决于模板的制备精度,目前最高分辨率能达到10 nm,但在实际应用中大多数精度为数百纳米。NIL的模板制备和

设备成本较高,但加工效率高,适用于大批量加工,比如生物芯片^[69]、纳米结构阵列等大面积微结构。

4 超透镜在显微成像中的应用

由具有高折射率的纳米介质构成的超表面,以亚波长的空间分辨率调控光场,展现了前所未见的性能。超表面的相位设计具有很大的灵活性,与传统的体积庞大的折射光学元件相比,超透镜的尺寸更紧凑、效率更高、性能更可靠。近年来,越来越多的研究人员在光片荧光显微镜、共聚焦显微镜、双光子显微镜和内窥镜等多种成像技术中引入超透镜进行深入研究,实现了对成像系统的分辨率、信噪比,以及整体光学系统的优化。

4.1 光片荧光显微镜

光片荧光显微(LSFM)能够减少光毒性并增强轴向的分辨率,实现快速三维图像采集,从而捕捉关键的生物动态过程。LSFM在细胞生物学^[73]、解剖学^[74],以及神经科学^[75]等众多学科中都产生了深远的影响。雷党愿课题组^[76]提出一种基于多光片照明的超透镜,引入LSFM实现强度均匀的多光片照明,可实现高分辨率和高信噪比的快速体成像。图8(a)为基于几何相位调控设计的超透镜示意图和波前精准调控的原理图。通过控制光片周期大于探测物镜的焦深,可以抑制平面之间成像的串扰。同时,单个光片厚度约为波长的一半。这项研究相较于传统的LSFM极大地简化了光学系统,有助于构建快速、高分辨率的光片显微镜。

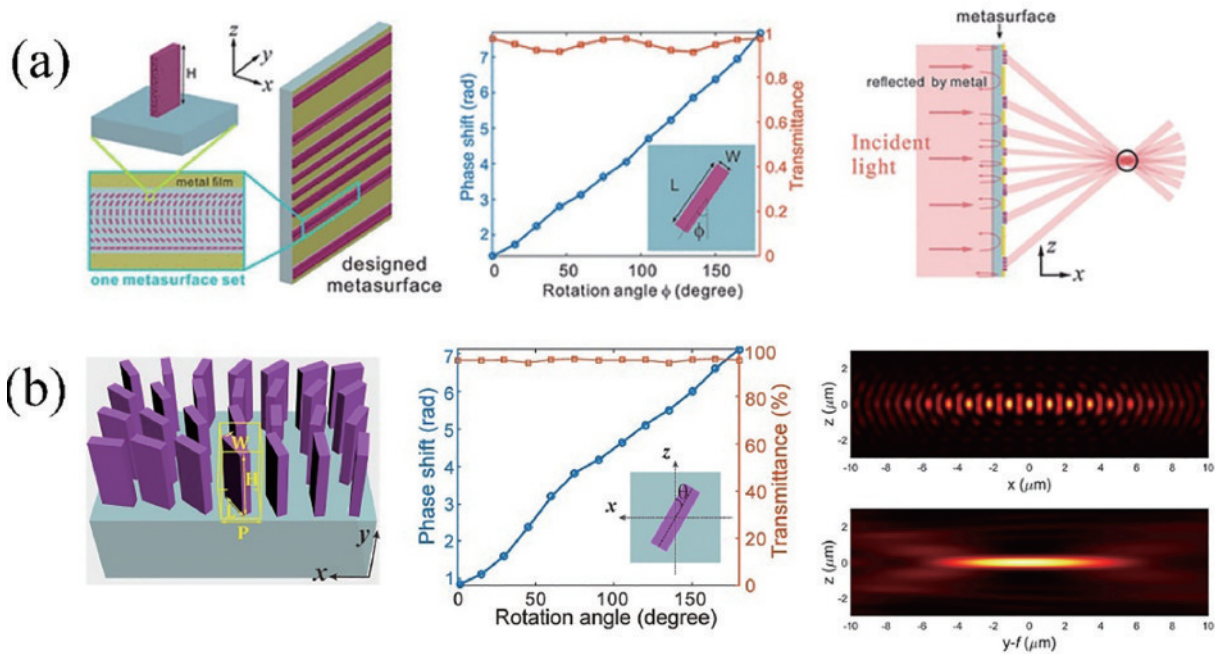


图 8 超透镜在LSFM中的应用。(a) TiO₂纳米柱组成的超表面示意图,透射率和相位与纳米柱旋转角 θ 的函数关系,离散光波在其重叠区域相互干涉产生多光片的示意图^[76]; (b) GaN纳米柱阵列组成的超表面示意图,透射率和相位与纳米柱旋转角 θ 的函数关系,光学晶格在 xz 和 yz 面的强度分布^[78]

Fig. 8 Application of metalens in LSFM. (a) Schematic diagram of the metasurface composed of TiO₂ nanopillars, transmittance and phase as a function of the nanopillar rotation angle θ , schematic of discrete light interfering with each other in their overlapping regions to produce a multi-optical sheet^[76]; (b) schematic of the metasurface composed of GaN nanopillar, transmittance and phase as a function of the nanopillar rotation angle θ , and intensity distribution of the optical lattice in the xz and yz planes^[78]

文献^[77]利用在多个方向上传播的相干平面波的干涉来形成光学晶格,产生强度均匀的光片。将具有晶格图案的薄光片引入LSFM进行照明,可以同时优化轴向分辨率、视场和离焦荧光信号引起的背景噪声。然而,这种方法需要复杂的光学系统调制才能产生干涉,这无疑增大了能量的损耗和成本。雷党愿课题组^[78]抓住超表面的优势,利用相位灵活设计的特点提出了一种利用超透镜产生光学晶格光片的方法。与传统LSFM系统相比,时间分辨率提高了3倍,同时还能保持相同的空间分辨率。图8(b)为利用氮化镓纳米

柱组成的超表面和波前示意图,以及模拟得到的光学晶格在 xz 和 yz 面的强度分布。可以看出,该方法不仅提升了整体照明范围,而且调控效率高,减少了系统的复杂性,为超表面在光学显微成像的应用中提供了帮助。Fan等^[79]通过遗传算法设计的超透镜产生光片照明并应用到LSFM系统中,实验结果表明,超透镜产生的光片的焦深可达4 mm,并可以抑制光片旁瓣强度,能量降低到主光束的7.3%,将此方法应用到双光子激发中,结果表明其能增强轴向的分辨率和信噪比。

4.2 双光子荧光显微镜

双光子荧光显微镜(TPFM)以其在深层组织中优越的成像能力而广泛应用于生命科学研究领域。这种方法可在组织内部产生较低的近红外散射光、较高的分辨率,以及低背景荧光噪声,从而实现组织内部数百微米深处的高质量图像^[80-82]。近年来,关于轻小型双光子显微镜的研发引起了活体脑成像领域的广泛关注。Arbabi等^[83]提出一种基于双波长超透镜的TPFM,超透镜能够对820 nm和605 nm实现消色差,可用来代替传统物镜,图9(a)、(b)分别为实验系统示意图和822 nm(上)、600 nm(下)在 yz 和 xy 平面聚焦的实验

结果。实验结果表明,超透镜的成像质量与传统物镜拍摄的图像质量相当,如图9(c)所示。这项工作证明了超透镜在双光子显微镜中的重要价值,进一步推动超透镜在成像领域的发展。最近,肖淑敏课题组^[84]在利用超透镜实现小型化TPFM的工作中有了新的进展,如图9(d)所示。图9(e)为微型TPM的920 nm聚焦超透镜原理图,该系统的横向分辨率为 $0.92\ \mu\text{m}$,轴向分辨率为 $18.08\ \mu\text{m}$,质量为 $1.36\ \text{g}$ 。图9(f)实现了小鼠脑组织双光子荧光成像,尽管最大成像深度仅有 $70\ \mu\text{m}$,但这也证明了超透镜在推进多光子显微镜和内窥镜应用方面的巨大潜力。

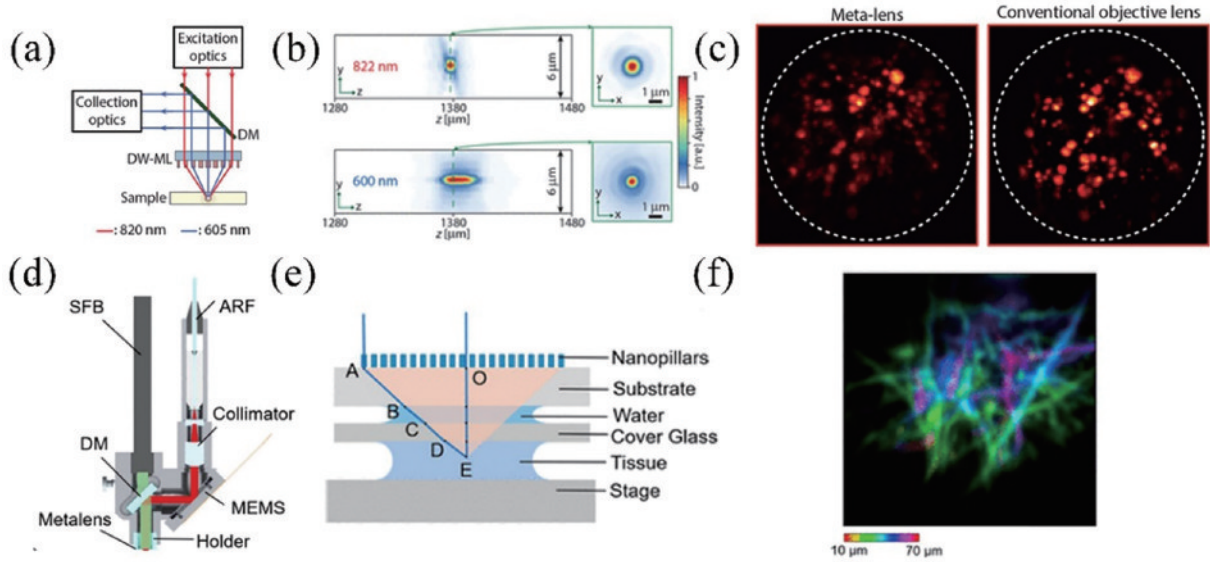


图9 超透镜在TPFM中的应用。(a)采用超透镜物镜的双光子显微镜原理图^[83]; (b) 822 nm(上)和600 nm(下)在 yz 和 xy 平面聚焦的实验结果^[83]; (c)使用超透镜和商业物镜对荧光微球的双光子荧光成像^[83]; (d)微型化TPFM示意图^[84]; (e)微型TPFM中超透镜原理图^[84]; (f)TPFM神经元成像结果^[84]

Fig. 9 Application of metalens in TPFM. (a) Schematic diagram of TPFM with metalens^[83]; (b) experimental results of 822 nm (top) and 600 nm (bottom) focused in the yz and xy planes^[83]; (c) two-photon fluorescence images of fluorescent microspheres with metalens and commercial objective^[83]; (d) schematic diagram of miniaturized TPFM^[84]; (e) principle diagram of metalens in miniature TPFM^[84]; (f) miniaturized TPFM for applications in biological imaging^[84]

4.3 内窥镜

利用内窥镜光学成像对内部器官进行高分辨成像已经有许多临床应用,内窥镜光学相干断层扫描(OCT),能够实现组织内部的微观成像,深度可达毫米级,在临床中可用于冠状动脉^[85]、胃肠道^[86]和肺部^[87]的检测、诊断和疾病监测。然而,目前的内窥镜OCT的分辨率和成像质量仍然存在较大局限性,对临床应用来说,提高内窥镜OCT系统的分辨率和成像深度至关重要。Suter课题组^[88]设计了一种新型光纤导管,将超透镜集成到内窥镜中,利用超透镜矫正球差和像散,系统成像分辨率接近衍射极限,并展示了在扩展焦深下的高分辨率成像结果,图10(a)为基于超透镜设计的内窥镜系统示意图与实物图。实验中使用超透镜OCT系统对人体肺部切片进行成像,可以清楚观察到,气管壁表面如图10(b)左上所示,图10(b)左下显

示了远端细支气管成像结果,通过该细支气管可以看到多层小肺泡结构,右栏提供了相应切片的明场图像。Sun等^[89]设计了一种在生物组织环境下的双波长共聚焦偏振不敏感超透镜,数值孔径为0.895的超透镜实现了915 nm和510 nm波长的消色差。仿真模拟结果表明,超透镜在荧光成像中的横向分辨率可达 $0.42\ \mu\text{m}$ 。相比在空气环境下,荧光的收集效率由5.92%提高到14.60%。

材料的色散特性使得透镜中几乎都存在色差,尽管内窥镜中单模光纤的色散可以忽略不计,但是光纤端面的透镜在聚焦和成像过程中会受到色差的干扰。Maier课题组^[90]在单模光纤端面3D打印了一个偏振不敏感消色差超透镜,能够在近红外波段($1.25\sim 1.65\ \mu\text{m}$)波段进行消色差和聚焦成像,具体如图10(c)所示。实验展示了使用3D纳米打印的消色差光纤用

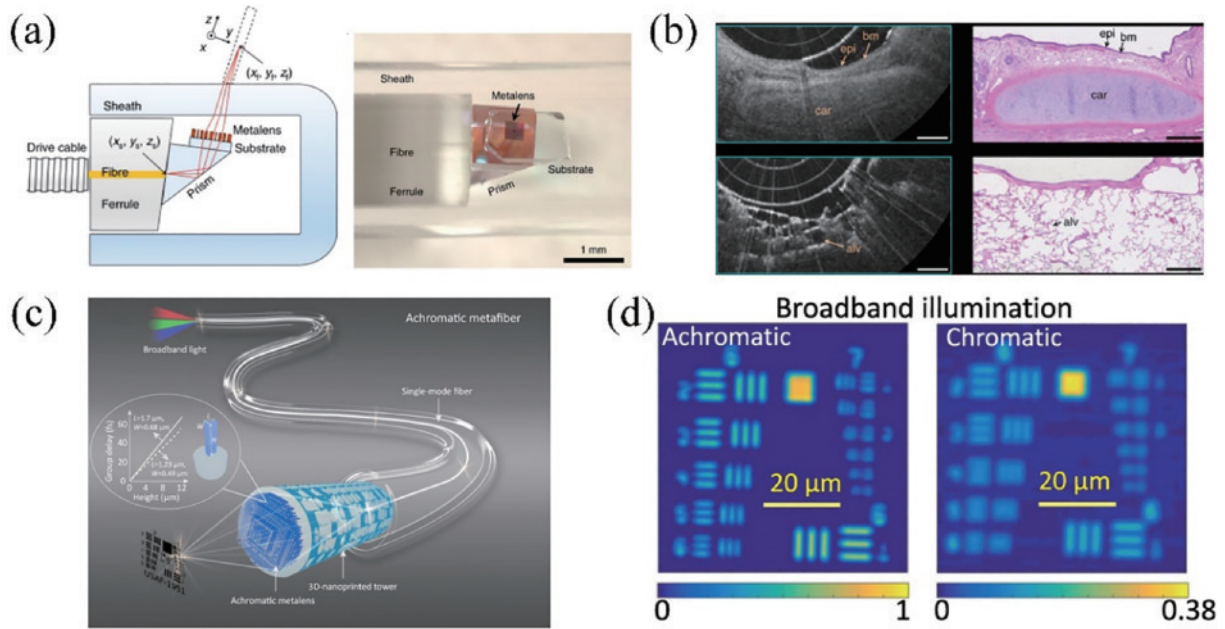


图 10 超透镜在内窥镜中的应用。(a)采用超透镜物镜的内窥镜原理图与实物图^[88]；(b)人体肺部切片成像,左栏超透镜内窥系统实验结果,右栏为明场成像结果,标尺为 500 μm ^[88]；(c)消色差超光纤的原理示意图^[90]；(d)宽带照明下消色差透镜的成像性能对比^[90]

Fig. 10 Application of metalens in endoscopy. (a) Schematic and actual image of endoscope based on metalens^[88]; (b) imaging of human lung sections, experimental results of metalens endoscopy system (left) and bright-field (right), scale bar is 500 μm ^[88]; (c) scheme of achromatic metalens fiber^[90]; (d) image performance of achromatic metalens with broadband illumination^[90]

于光纤共聚焦成像的效果,图 10(d)为在宽带照明下对分辨率板聚焦时清晰的像,横向分辨率可达 4.92 μm 。超透镜的出现推动了光纤在内窥镜成像、飞秒激光辅助治疗和深层组织成像等领域中的应用。

5 结 论

由于超薄和超轻的特点,以及对波前进行灵活调控的能力,超透镜展现出了巨大的发展潜力,特别是在生物显微成像技术领域中迅速兴起。相较于传统显微成像,在结构优化后超透镜成像分辨率可接近衍射极限,这对于观察生物组织结构的精细程度具有重要意义。然而,超透镜也伴随一些挑战,比如成像视场和深度较小、波长带宽受限、像差矫正的难度增加,以及更高的制造要求,因此需要根据具体的应用需求和技术要求进行权衡,以确保实现超透镜的最佳设计。

本文重点阐述了超透镜在显微成像中的应用,并从超透镜的设计、加工和成像应用等 3 个方面进行了深入的探讨。首先,介绍了超透镜的相位设计原理,涵盖了共振相位调制、几何相位调制,以及传播相位调制。其次,对超透镜的主要制造工艺进行了回顾,包括光刻、EBL,以及纳米压印技术。最后,回顾了各种显微系统的进展,详细介绍了超透镜在光片荧光显微镜、双光子显微镜,以及内窥镜成像系统中的广泛应用,从而突出超透镜在生命科学领域所具有的显著价值。

目前,超透镜的轻便性、高效性、高灵活性和高集成度等特性使其在 AR/VR、内窥镜、光纤通信和传感

等技术领域崭露头角,理论上有能力取代目前市场上的大部分光学透镜。相信在未来,超透镜将开创光学的新时代。

参 考 文 献

- [1] Zheng X M, Wang L, Wang M T, et al. Resolution improvement of structured illumination microscopy using non-diffraction-limited point-scanned fluorescence fringe [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(7): 2200796.
- [2] Chen X, Kandel M E, He S H, et al. Artificial confocal microscopy for deep label-free imaging[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(3): 250-258.
- [3] Yang X F, Zhang H, Liu Z X, et al. Time-stretch chromatic confocal microscopy for multi-depth imaging [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(12): 2300387.
- [4] Han Q, Shi J P, Shi F H. Sidelobe suppression in structured light sheet fluorescence microscopy by the superposition of two light sheets[J]. *Biomedical Optics Express*, 2023, 14(3): 1178-1191.
- [5] Liu G X, Ruan X T, Milkie D E, et al. Characterization, comparison, and optimization of lattice light sheets[J]. *Science Advances*, 2023, 9(13): eade6623.
- [6] 于湘华, 刘超, 柏晨, 等. 光片荧光显微成像技术及应用进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 100001. Yu X H, Liu C, Bai C, et al. Progress in light-sheet fluorescence microscopy and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 100001.
- [7] Fan Y, Sun J S, Chen Q, et al. Optimal illumination scheme for isotropic quantitative differential phase

- contrast microscopy[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(8): 890-904.
- [8] Soltau J, Osterhoff M, Salditt T. Coherent diffractive imaging with diffractive optics[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(22): 223901.
- [9] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(34): 6994-7001.
- [10] Li T, Chen C, Xiao X J, et al. Revolutionary meta-imaging: from superlens to metalens[J]. *Photonics Insights*, 2023, 2(1): R01.
- [11] 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.
- [12] Wang Y L, Fan Q B, Xu T. Design of high efficiency achromatic metalens with large operation bandwidth using bilayer architecture[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2021, 4(1): 200008.
- [13] Zhang J, Dun X, Zhu J Y, et al. Large numerical aperture metalens with high modulation transfer function[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(5): 1389-1396.
- [14] Zhang S J, Chen X Y, Liu K, et al. On-chip non-volatile reconfigurable THz varifocal metalens[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300482.
- [15] Chen P, Fang B, Li J M, et al. Flexible control of multi-focus with geometric phase encoded metalens based on the complex digital addition principle[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107332.
- [16] Shen Z C, Zhao F, Jin C Q, et al. Monocular metasurface camera for passive single-shot 4D imaging[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1035.
- [17] Zeng B W, Li C X, Fang B, et al. Flexible tuning of multifocal holographic imaging based on electronically controlled metasurfaces[J]. *Photonics Research*, 2023, 12(1): 61-69.
- [18] Javed I, Kim J S, Naveed M A, et al. Broad-band polarization-insensitive metasurface holography with a single-phase map[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(31): 36019-36026.
- [19] Hsieh P Y, Fang S L, Lin Y S, et al. Integrated metasurfaces on silicon photonics for emission shaping and holographic projection[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(21): 4687-4695.
- [20] Chung H, Zhang F, Li H, et al. Inverse design of high-NA metalens for maskless lithography[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2371-2381.
- [21] Jin Z, Lin Y, Wang C M, et al. Topologically optimized concentric-nanoring metalens with 1 mm diameter, 0.8 NA and 600 nm imaging resolution in the visible[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 10489-10499.
- [22] Yang F, Shalaginov M Y, Lin H I, et al. Wide field-of-view metalens: a tutorial[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(3): 033001.
- [23] Hu Y Q, Jiang Y T, Zhang Y, et al. Asymptotic dispersion engineering for ultra-broadband meta-optics[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6649.
- [24] Balli F, Sultan M A, Ozdemir A, et al. An ultrabroadband 3D achromatic metalens[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(4): 1259-1264.
- [25] 景晓丽, 王涌天, 黄玲玲. 基于超构表面的三维成像技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(8): 0811003.
- Jing X L, Wang Y T, Huang L L. Metasurface-based three-dimensional imaging technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811003.
- [26] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139-152.
- [27] Zhao M X, Chen M K, Zhuang Z P, et al. Phase characterisation of metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 52.
- [28] Liu W W, Ma D N, Li Z C, et al. Aberration-corrected three-dimensional positioning with a single-shot metalens array[J]. *Optica*, 2020, 7(12): 1706-1713.
- [29] Zhu A Y, Chen W T, Sisler J, et al. Compact aberration-corrected spectrometers in the visible using dispersion-tailored metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(14): 1801144.
- [30] Zhao F, Li Z P, Li S, et al. Terahertz metalens of hyperdispersion[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(4): 886-895.
- [31] Shen Z X, Zhou S H, Li X N, et al. Liquid crystal integrated metalens with tunable chromatic aberration[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036002.
- [32] Deng F S, Guo Z W, Ren M N, et al. Bessel beam generated by the zero-index metalens[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2022, 174: 89-106.
- [33] Wang Y L, Min C J, Zhang Y Q, et al. Drawing structured plasmonic field with on-chip metalens[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 1969-1976.
- [34] Wang R X, Han J, Liu J L, et al. Multi-foci metalens for terahertz polarization detection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(13): 3506-3509.
- [35] Kats M A, Yu N F, Genevet P, et al. Effect of radiation damping on the spectral response of plasmonic components[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21748-21753.
- [36] 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.
- [37] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [38] Yu Y F, Zhu A Y, Paniagua-Domínguez R, et al. High-transmission dielectric metasurface with 2π phase control at visible wavelengths[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(4): 412-418.
- [39] Li J, Wu T S, Xu W B, et al. Mechanisms of 2π phase control in dielectric metasurface and transmission enhancement effect[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 23186-23196.
- [40] Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Section A*, 1956, 44(5): 247-262.

- [41] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. Proceedings of the Royal Society of London A Mathematical and Physical Sciences, 1984, 392(1802): 45-57.
- [42] Chen C, Gao S L, Song W G, et al. Metasurfaces with planar chiral meta-atoms for spin light manipulation[J]. Nano Letters, 2021, 21(4): 1815-1821.
- [43] Moreno-Peñarrubia A, Teniente J, Kuznetsov S, et al. Ultrathin and high-efficiency Pancharatnam-Berry phase metalens for millimeter waves[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(22): 221105.
- [44] Xu H X, Wang G M, Cai T, et al. Tunable Pancharatnam-Berry metasurface for dynamical and high-efficiency anomalous reflection[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27836-27848.
- [45] Yuan Y, Yan Z L, Zhang P F, et al. A broadband achromatic dielectric planar metalens in mid-IR range[J]. Photonic Sensors, 2022, 13(1): 230126.
- [46] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. Nature Communications, 2012, 3: 1198.
- [47] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [48] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. Nature Communications, 2017, 8: 187.
- [49] Ogawa C, Nakamura S, Aso T, et al. Rotational varifocal moiré metalens made of single-crystal silicon meta-atoms for visible wavelengths[J]. Nanophotonics, 2022, 11(9): 1941-1948.
- [50] Chen C, Song W G, Chen J W, et al. Spectral tomographic imaging with aplanatic metalens[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 99.
- [51] 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.
- [52] Zhu Y C, Liu S Y, Chang Y, et al. Broadband polarization-insensitive metalens with excellent achromaticity and high efficiency for the entire visible spectrum[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(20): 201702.
- [53] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths[J]. Nano Letters, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [54] Liang Y T, Zhou J X, Yin D F, et al. Monolithically integrated electro-optic modulator fabricated on lithium niobate on insulator by photolithography assisted chemo-mechanical etching[J]. Journal of Physics: Photonics, 2021, 3(3): 034019.
- [55] Hu T, Tseng C K, Fu Y H, et al. Demonstration of color display metasurfaces via immersion lithography on a 12-inch silicon wafer[J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19548-19554.
- [56] Nuwaysir E F, Huang W, Albert T J, et al. Gene expression analysis using oligonucleotide arrays produced by maskless photolithography[J]. Genome Research, 2002, 12(11): 1749-1755.
- [57] Ossiander M, Meretska M L, Hampel H K, et al. Extreme ultraviolet metalens by vacuum guiding[J]. Science, 2023, 380(6640): 59-63.
- [58] Du B T, Wu Z H, Xia J, et al. Large-area all-dielectric metasurface fabricated by an anodized aluminum oxide template[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10465-10470.
- [59] Choi H, Kim J S, Kim W S, et al. Realization of high aspect ratio metalenses by facile nanoimprint lithography using water-soluble stamps[J]. PhotonIX, 2023, 4(1): 18.
- [60] Hadibrata W, Wei H M, Krishnaswamy S, et al. Inverse design and 3D printing of a metalens on an optical fiber tip for direct laser lithography[J]. Nano Letters, 2021, 21(6): 2422-2428.
- [61] Cheng Q Q, Ma M L, Yu D, et al. Broadband achromatic metalens in terahertz regime[J]. Science Bulletin, 2019, 64(20): 1525-1531.
- [62] Chang W H, Lin J H, Kuan C H, et al. Generation of concentric space-variant linear polarized light by dielectric metalens[J]. Nano Letters, 2021, 21(1): 562-568.
- [63] Huang T Y, Grote R R, Mann S A, et al. A monolithic immersion metalens for imaging solid-state quantum emitters[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2392.
- [64] Domokos P, Adam P, Janszky J, et al. Atom de Broglie wave deflection by a single cavity mode in the few-photon limit: quantum prism[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(9): 1663-1666.
- [65] Manfrinato V R, Stein A, Zhang L H, et al. Aberration-corrected electron beam lithography at the one nanometer length scale[J]. Nano Letters, 2017, 17(8): 4562-4567.
- [66] Wang R X, Intaravanne Y, Li S T, et al. Metalens for generating a customized vectorial focal curve[J]. Nano Letters, 2021, 21(5): 2081-2087.
- [67] Paniagua-Domínguez R, Yu Y F, Khaidarov E, et al. A metalens with a near-unity numerical aperture[J]. Nano Letters, 2018, 18(3): 2124-2132.
- [68] Ma Z B, Liang S, Xiao K, et al. Superhydrophilic polyvinylidene fluoride membrane with hierarchical surface structures fabricated via nanoimprint and nanoparticle grafting[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 612: 118332.
- [69] Zanut A, Cian A, Cefarin N, et al. Nanoelectrode arrays fabricated by thermal nanoimprint lithography for biosensing application[J]. Biosensors, 2020, 10(8): 90.
- [70] Hillmer H, Woidt C, Istock A, et al. Role of nanoimprint lithography for strongly miniaturized optical spectrometers[J]. Nanomaterials, 2021, 11(1): 164.
- [71] Yoon G, Kim K, Huh D, et al. Single-step manufacturing of hierarchical dielectric metalens in the visible[J]. Nature Communications, 2020, 11: 2268.
- [72] Brière G, Ni P N, Héron S, et al. An etching-free approach toward large-scale light-emitting metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(14): 1801271.
- [73] Tomer R, Khairy K, Amat F, et al. Quantitative high-speed imaging of entire developing embryos with

- simultaneous multiview light-sheet microscopy[J]. *Nature Methods*, 2012, 9(7): 755-763.
- [74] Royer L A, Lemon W C, Chhetri R K, et al. Adaptive light-sheet microscopy for long-term, high-resolution imaging in living organisms[J]. *Nature Biotechnology*, 2016, 34(12): 1267-1278.
- [75] McDole K, Guignard L, Amat F, et al. In toto imaging and reconstruction of post-implantation mouse development at the single-cell level[J]. *Cell*, 2018, 175(3): 859-876.
- [76] Shi F H, Qiu M, Zhang L, et al. Multiplane illumination enabled by Fourier-transform metasurfaces for high-speed light-sheet microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1676-1684.
- [77] Chang B J, Kittisopikul M, Dean K M, et al. Universal light-sheet generation with field synthesis[J]. *Nature Methods*, 2019, 16(3): 235-238.
- [78] Shi F H, Wen J, Lei D Y. High-efficiency, large-area lattice light-sheet generation by dielectric metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(12): 4043-4051.
- [79] 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.
- [80] Helmchen F, Denk W. Deep tissue two-photon microscopy[J]. *Nature Methods*, 2005, 2(12): 932-940.
- [81] He H S, Tang H J, Zhou M, et al. Deep-tissue two-photon microscopy with a frequency-doubled all-fiber mode-locked laser at 937 nm[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2022, 1(2): 026001.
- [82] Liu Z H, Lu X Y, Villette V, et al. Sustained deep-tissue voltage recording using a fast indicator evolved for two-photon microscopy[J]. *Cell*, 2022, 185(18): 3408-3425.
- [83] Arbabi E, Li J Q, Hutchins R J, et al. Two-photon microscopy with a double-wavelength metasurface objective lens[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 4943-4948.
- [84] Wang C H, Chen Q M, Liu H L, et al. Miniature two-photon microscopic imaging using dielectric metalens[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(17): 8256-8263.
- [85] Kume T, Akasaka T, Kawamoto T, et al. Assessment of coronary arterial thrombus by optical coherence tomography[J]. *The American Journal of Cardiology*, 2006, 97(12): 1713-1717.
- [86] Li X D, Boppart S A, Van Dam J, et al. Optical coherence tomography: advanced technology for the endoscopic imaging of Barrett's esophagus[J]. *Endoscopy*, 2000, 32(12): 921-930.
- [87] Lam S, Standish B, Baldwin C, et al. In vivo optical coherence tomography imaging of preinvasive bronchial lesions[J]. *Clinical Cancer Research*, 2008, 14(7): 2006-2011.
- [88] 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.
- [89] Sun D Q, Yang Y J, Liu S J, et al. Excitation and emission dual-wavelength confocal metalens designed directly in the biological tissue environment for two-photon micro-endoscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 11(8): 4408-4418.
- [90] Ren H R, Jang J, Li C H, et al. An achromatic metafiber for focusing and imaging across the entire telecommunication range[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4183.