

光学学报

超构表面赋能光学微操控技术(特邀)

徐孝浩^{1,2}, 高文禹^{1,2}, 李添悦^{3,4}, 邵天骅^{3,4}, 李星仪⁵, 周源^{1,2}, 高歌泽^{3,4}, 王国玺^{1,2}, 严绍辉^{1,2}, 王黎明^{3,4**},
姚保利^{1,2*}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 南京大学物理学院, 江苏 南京 210093;

⁴南京大学人工微结构科学与技术协同创新中心, 江苏 南京 210093;

⁵浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 光学超构表面凭借其小型化集成化的优势和对光场出色的调控能力,近年来已被深入应用于光学微操控技术研究,这标志着该交叉领域进入了新的发展阶段。特别地,由于超构表面的尺寸在亚波长级别,具有被光场驱动从而产生机械运动的潜力,这一特性为新一代光驱动的人工微机器人提供了重要的理论基础和技术支撑。本文依次从光学微操控的基本原理和超表面的相位机制出发,详细回顾了基于超构表面的多种微操控器件,包括超构表面光镊、多功能微操控系统、超构机械等,并结合微纳结构的拓扑光学性质,对拓扑光操控等新奇效应进行了探讨。最后,本文展望了超构表面微操纵技术的未来发展方向和目标。

关键词 超构表面; 光学微操控; 光镊; 光子力学

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231748

1 引言

光学微操控技术借助光力实现对微粒的动力学控制,具有非接触性并可在真空环境中操作等特点。自20世纪80年代Ashkin等^[1]发明光镊以来,该领域经历了飞速的发展^[2-5],并催生出了诸多新兴研究方向,如全息光镊^[6-8]、近场倏逝波光镊^[9-12]、光纤光镊^[13-15]、光电镊^[16-17]、光致温度场光镊^[18-19]等,为生物学、化学、纳米科学和量子技术等领域提供了丰富的研究手段^[20-26]。这些操控工具不仅可以实现对微小物体的捕获^[27-29]、分离^[30]和输运^[31-34],而且可以进行更为精细的操控,如微小物体的旋转^[35-40]。然而,传统的操控方法需依赖紧聚焦的局域光场操控物体,极大限制了光力的作用范围。此外,为了产生具有精细结构的光场,通常需使用空间光调制器等体积较大的光学元件,从而令微纳操控系统难以小型化和集成化。

近年来,由亚波长纳米天线构成的超构表面集成器件为光学微操控领域带来了新的机遇。这种超薄人工微结构器件通过对自身微纳结构的几何形状和材料

进行特殊设计,能够实现对光的振幅、相位和偏振等多个自由度的灵活调控^[41-46]。与传统的光学元件如液晶空间光调制器、光栅和透镜相比,超构表面展现出更大的工作带宽、结构紧凑性和集成度,已被广泛应用于入射光的异常反射和折射^[47-48]、宽带高分辨率彩色成像^[49-51]、矢量宽带全息显示^[52-54]以及超紧凑量子光源^[55-56]等先进光子技术。随着超构表面技术的不断发展,其在光学微操控方面的应用潜力也日益显现。超构表面不但拥有接近衍射极限的聚焦能力,而且其在超薄体积的基础上,拥有对光场多个维度的调控能力。这种片上集成器件极大缩小了微操控系统的体积,同时丰富了光场调控的自由度^[57-62]。此外,对光场的优异调控性能也赋予了这类微结构独特的光子力学性质,使它们能在平面波激发下产生可控移动,为实现基于平面波的宽场操控技术开辟了途径。

本文旨在概述近年来超构表面光学微操控方面的研究进展,首先将介绍光力和光学超构表面的基本原理,然后详细阐述基于超构表面的微操控器件设计,包括超构表面光镊、多功能微操控系统等。此外,本文还

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2023-12-09; 录用日期: 2023-12-29; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFA1404300, 2023YFF0613700)、国家自然科学基金(12274181, 11974417, 12127805, 62135005, 12325411, 62288101, 11774162)、中央高校基本科研业务费专项资金(020414380175)、瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(SKLST202218)、江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX23_0096)

通信作者: *yaobl@opt.ac.cn; **wangshuming@nju.edu.cn

将探讨基于拓扑光子学效应的微操控方案,以及超构表面在光驱动微纳机械系统中的创新应用。通过对这些研究内容的剖析,希望能更好地挖掘超构表面在微纳操控领域中的优势以及面临的挑战,并为其未来的发展和应用提供有益的参考。

2 光力的基本原理

这一节首先讨论光力的物理起源和计算方法。光和微粒相互作用会伴随光学动量的传递,导致施加光学力在粒子上,这个光学力可以通过考虑整个系统的动量守恒,并计算麦克斯韦应力张量在包围粒子的一个封闭表面上的积分来确定。对于时谐光场(单色波),研究者通常只对时间平均的光力感兴趣,在这种情况下,作用在粒子上的光力 $\mathbf{F}^{[63-65]}$ 表示为

$$\mathbf{F} = \oint_S \hat{\mathbf{T}}_M \cdot \mathbf{n} ds, \quad (1)$$

式中: S 为一任意包围粒子的封闭曲面; \mathbf{n} 表示 S 上朝外指向的单位法向量; $\hat{\mathbf{T}}_M$ 代表时均 Minkowski 型的麦克斯韦应力张量:

$$\hat{\mathbf{T}}_M = \frac{1}{2} \text{Re} [\epsilon_0 \mathbf{E}^* \mathbf{E} + \mu_0 \mathbf{H}^* \mathbf{H} - \frac{1}{2} (\epsilon_0 |\mathbf{E}|^2 + \mu_0 |\mathbf{H}|^2) \hat{\mathbf{I}}], \quad (2)$$

式中, $\hat{\mathbf{I}}$ 为单位张量。该应力张量来源于背景到嵌入体的光动量传递。对于尺寸远小于波长的粒子 ($d < \lambda/10$), 粒子的偶极散射占主导地位, 在这种近似下, 从式(1)出发, 可以推导出偶极近似下光力的解析表达式^[66-68]为

$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{2} \text{Re} [(\nabla \mathbf{E}) \cdot \mathbf{p}] + \frac{1}{2} \text{Re} [(\nabla \mathbf{H}^*) \cdot \mu_0 \mathbf{m}] - \frac{k_0^4 c \mu_0}{12\pi} \text{Re} [\mathbf{p} \times \mathbf{m}^*], \quad (3)$$

式中: \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别代表入射光束的电场和磁场; 参数 \mathbf{p} 和 \mathbf{m} 分别是电偶极矩和磁偶极矩。

除了线性动量, 光场还可以携带角动量, 在与微粒相互作用时, 光学角动量会传递给粒子从而导致光学扭矩。光学角动量可以分为自旋角动量(SAM)和轨道角动量(OAM)^[69-71]。光学 SAM 与光场的偏振态直接相关, 左旋圆和右旋圆偏振光为 SAM 的两个本征态, 每光子分别携带 $+\hbar$ 和 $-\hbar$ 的 SAM; 1992 年, Allen 等^[72]提出了光的 OAM 的概念, 他们认为具有螺旋相位因子 $\exp(i l \phi)$ (其中 l 表示拓扑荷数, ϕ 表示方位角) 的光场可以携带 $l\hbar$ (每光子) 的 OAM。典型 OAM 光场包括 Laguerre-Gaussian (LG) 光束和 Bessel 光束。同样地, 通过考虑整个系统的角动量守恒, 光学扭矩^[63]可以表示为

$$\mathbf{M} = \oint_S (\mathbf{r} \times \hat{\mathbf{T}}_M) \cdot \mathbf{n} ds, \quad (4)$$

式中, \mathbf{r} 是参考原点到封闭曲面上点的位置矢量。光学

扭矩的大小和方向取决于粒子参数, 如几何参数和电磁参数, 同时也取决于照明光场的分布。深入研究光与物质相互作用的物理机制, 并利用麦克斯韦应力张量计算过程伴随的光学力和力矩, 为其在光学操纵微粒子、纳米尺度物体的旋转操作等领域的应用提供了基础。

3 超构表面的物理机制

上一节讨论了光与物质相互作用的力学机制, 可以看出结构化的光场能够产生丰富的力学效应。因此, 本节将介绍在微纳尺度下能够对光场实现精密调控的人工微结构器件——光学超构表面的基本工作机制, 它不仅在功能上与空间光调制器、数字微镜器件等相位调制器件相媲美, 也可进一步实现衍射极限级别的聚焦, 具有像素级的分辨率。

3.1 共振相位

超构表面的物理机制来源于广义 Snell 定律, 如图 1(a) 所示, 它描述了在两个不同介质界面处可引入相位梯度, 从而调控波前。因此, 构建等效折射率不同的纳米天线, 可以实现广义的折射与反射定律^[48,73], 写为

$$\begin{cases} n_i \sin(\theta_i) - n_t \sin(\theta_t) = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dx} \\ \sin(\theta_r) - \sin(\theta_i) = \frac{\lambda_0}{2\pi n_i} \frac{d\phi}{dx} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: λ_0 为真空波长; n_t 和 n_i 为界面两侧介质的折射率; θ_i 、 θ_t 和 θ_r 分别为入射、折射和反射角, 当 $\frac{d\phi}{dx} = 0$

时, 以上定律退化成经典的 Snell 定律。2011 年, Capasso 团队的 Yu 等^[73]利用这一原理, 设计了具有双共振特性的 V 形金纳米天线 [图 1(b) 左侧], 其中, 平行和垂直于 V 形天线的对称轴方向的电场组件会诱导“对称”与“反对称”模态。由于这类亚波长的金属天线可以看作是光学的共振器, 当外部光的波长与该结构的共振波长相近时, 共振器内会诱发位移电流, 因而散射场与入射场的相位关系会出现显著的偏差, 进而形成强烈的散射电磁场辐射到自由空间中, 因此这种等离激元超构表面的相位被称为“共振相位”。通过微调二维阵列中共振结构的形态, 使其共振波长发生改变, 从而实现 $0 \sim 2\pi$ 的相位变化, 进而实现特定的界面相位变化, 如异常的光折射、反射和涡旋光的生成。同一时期, Sun 和 Zhou 团队^[48]在微波频段上设计了“工”字形的共振超构表面, 实现了微波频段的表面波与空间波的转换, 如图 1(b) 右侧所示。此外, 类似的光学共振结构也可以通过空气腔室、特定形态的介质粒子或金属纳米构造等方法来制备。

3.2 几何相位

1956 年, Pancharatnam 在深入探讨电磁波偏振状态时, 意识到在转换过程中会出现额外的相位。继而在 1984 年, Berry 指出, 量子系统的态在绝热近似下经

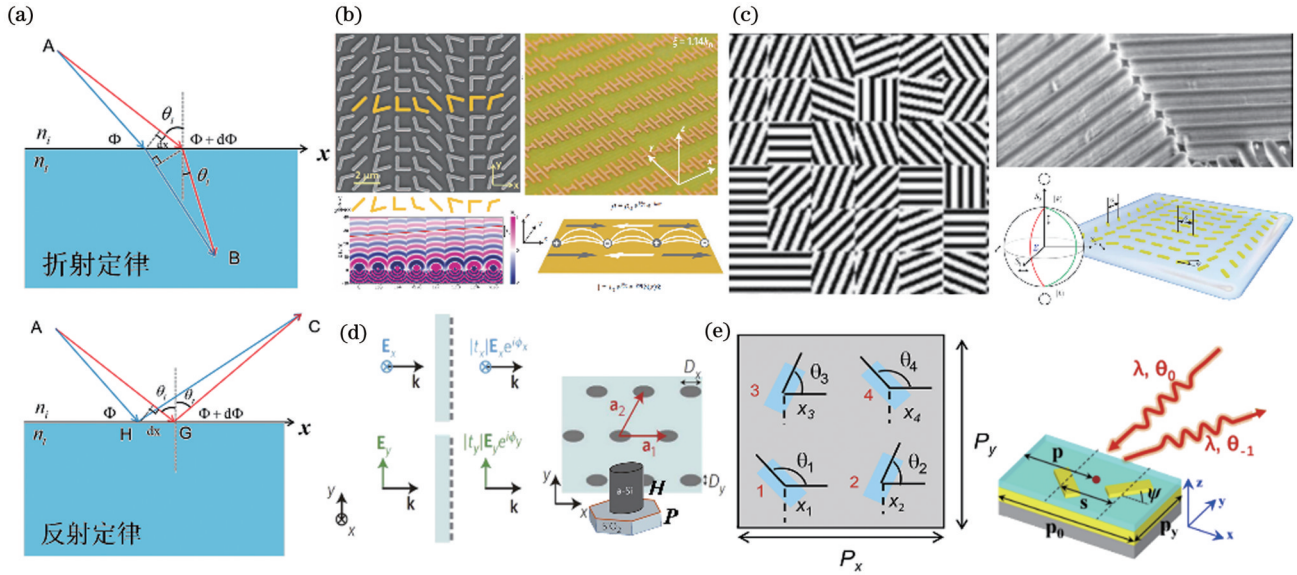


图 1 各种类型超构表面的物理机制。(a) 广义 Snell 折射和反射定律示意图^[73]；(b) 基于共振相位的等离激元超构表面^[48, 73]；(c) 几何相位的产生原理及利用光栅和金属天线实现的几何相位超构表面^[74-75]；(d) 基于传播相位的超构表面^[76]；(e) 基于绕行相位的超构表面^[77-79]

Fig. 1 Physical mechanisms of various types of metasurfaces. (a) Schematic of generalized Snell's law of refraction and reflection^[73]; (b) plasmonic metasurface based on resonant phase^[48, 73]; (c) principle of generating geometric phase and implementation of geometric phase metasurfaces using gratings and metal antennas^[74-75]; (d) metasurface based on propagation phase^[76]; (e) metasurface based on detour phase^[77-79]

历一个初态-末态-初态的演化时,会引入与一个与演化路径紧密关联的相位。在光场调控中,可以利用庞加莱球来描述光场偏振的演化过程,并从中揭示几何相位的物理本质^[80-82]。如图 1(c)中的庞加莱球所示,当光场的偏振从代表右旋偏振光(RCP)的北极,通过赤道,并经过代表左旋偏振光(LCP)的庞加莱球南极回到北极时,光场相位的改变等于演化路径所对应立体角的一半。

实际上,研究者可以用琼斯矩阵来精确地描述超构表面的偏振状态:

$$\mathbf{J} = \mathbf{L}(-\theta) \begin{bmatrix} t_h & 0 \\ 0 & t_v \end{bmatrix} \mathbf{L}(\theta), \quad (6)$$

式中: t_h 和 t_v 分别表示微结构对入射光场沿快轴和慢轴的分量复振幅的调制; θ 为微结构的取向对应的旋转角; $\mathbf{L}(\theta)$ 为相应的旋转矩阵,可以表示为

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),化简得到

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} t_h \cos^2 \theta + t_v \sin^2 \theta & (t_h - t_v) \sin \theta \cos \theta \\ (t_h - t_v) \sin \theta \cos \theta & t_h \sin^2 \theta + t_v \cos^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于圆偏振入射光,微结构的输入和输出电场之间满足以下关系:

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} E_{xin} \\ E_{yin} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \frac{t_h + t_v}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + \frac{t_h - t_v}{2} e^{i2\sigma\theta} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, $\sigma = \pm 1$, 表示右旋和左旋圆偏振态。根据式(9)可知,出射光场中除了包含原有的偏振分量,还产生了携带附加几何相位 $2\sigma\theta$ 的正交偏振分量。因此,几何相位与入射光的螺旋偏振(σ)和超构表面上各向异性结构的旋向(θ)有关,而与入射光的波长和微结构的材料无关。早在 20 世纪初,基于几何相位的光学元件就被 Bomzon 等^[74]在实验上实现,值得一提的是,2012 年,Chen 等^[75]首次利用旋转的金属纳米棒实现了亚波长聚焦功能,为后来超构表面调控全局相位的光场分布奠定了基础。

3.3 传播相位

近年来,介质超构表面因其低损耗的材料特性及与传统电子制造工艺的兼容性而受到广大研究者的关注。相比之下,基于等离激元的超构表面在透射式器件中,由于严重的欧姆损耗而常常显示出较低的工作效率。常见的介质超构材料包括硅(Si)、氮化硅(Si_3N_4)和氮化镓(GaN)、二氧化钛(TiO_2)。这种超构表面能够利用光在高纵横比的波导型天线中的传播,累积所需的相位,进而达到相位的调控,这种相位被称为传播相位或动力学相位,如图 1(d)所示^[77-78]。通常,当电磁波的波长为 λ 且在折射率为 n 的介质中传播一段距离 d 时,电磁波所积累的传播相位可以表示为

$$\phi = (2\pi/\lambda)nd. \quad (10)$$

为了在超构表面上获得足够的相位延迟,需要相对较大的结构厚度。由于传统电子制造工艺中薄膜厚度保持不变,传播相位则依赖于每个位置改变微结构

的等效折射率,这往往可以通过调整其几何参数来达到。此外,为了保证器件在零级处有最大的光利用率,需要调整结构尺寸小于波长。由于传播相位受纳米结构的形状影响较大,因此可以结合光学双折射原理,通过调整不同形状以实现偏振态的操控,来实现偏振解耦的复用功能;抑或利用材料本身的属性,对不同波长下的相位延迟进行操控,从而实现对色散的调控。

3.4 绕行相位

最初,为了达到相位调制的效果,光栅设计中引入了绕行相位。而随着超构表面技术的发展,波前整形技术中再次探讨了绕行相位。如图 1(e)所示,研究者可以考虑一个超构表面,其由双纳米柱组成的单元构筑而成,其中每个单元都由两根相同的纳米柱构成。当一个波长为 λ 的平面波以 $\theta = (\theta_x, \theta_y)$ 入射,它在样品面的复振幅可以定义为

$$U(x, y) = U_0 [t_1 + t_2 \exp(ik_r r)], \quad (11)$$

式中: t_1 和 t_2 表示两个纳米柱的透射率; $k_r = \frac{2\pi}{\lambda} \sin(\theta_r)$ 为相对于 r 方向的波矢分量。在超构表面单元中,如果相邻纳米柱在 r 方向的间距为 Δr ,由两纳米柱散射的波将产生相位延迟为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta r}{p}, \quad (12)$$

式中, $\Delta\varphi$ 代表超构表面单元为入射光带来的绕行相位。当入射角为 $\theta_r = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{np}\right)$ 时(p 为超构表面单元的周期),复振幅可表示为

$$U(r) = U_0 t_2 \exp\left(i \frac{2\pi r}{p}\right). \quad (13)$$

因此,可以通过微调每个单元内纳米柱的位置来精确控制绕行相位。基于此,Deng 等^[78]通过构造金属结构的双元胞超构表面中不同的位移及取向,构造绕行相位从而调控一级衍射的偏振态和相位,实现了矢量全息。随后 Bao 等^[77, 79]利用绕行相位调制又分别实现了多偏振通道的振幅相位同时调制的全息显示、矢量光产生等功能。

随着对超构表面功能的需求持续增加,一系列的相位机制如拓扑相位^[83-84]、传播和几何相位结合的复合相位^[85-87]及非局域调控机制^[88-92]接连被提出,这无疑为超构光子学领域注入了新的活力。目前,超构表面正向实际应用领域稳步发展,其中器件的调控维度、效率和稳定性成为了未来发展的核心指向。特别地,效率往往与微结构的尺寸参数及其对应工作波段的材料选择息息相关,而调控维度和器件的稳定性则更多地取决于其背后的物理机制。

4 超构表面光操控器件

由于超构表面的小型化、平面化、多功能和集成化

的优点以及灵活调控相位的强大能力,这种新型微纳器件逐渐被用于非接触式光学微操控系统中。本节将对超构表面光镊的相关工作以及应用的最新进展进行讨论。

4.1 超构表面光镊

光镊依赖于高度聚焦的激光光束,利用其焦点来实现微小物体的捕获和操纵。当目标粒子被定位于光束的焦点附近,其受到的散射力与光强梯度力达到平衡状态,粒子被稳定地“捕获”或“固定”于该焦点位置。通过超构表面调制生成高强度聚焦的光场,可以在极大缩小体积的情况下也提供光镊的基本功能^[93-100]。2020年,Chantakit 等^[101]设计并实验验证了一款基于非晶硅的几何相位超构透镜,用于在近红外波段进行二维光学捕获操作。这种超构透镜由于其体积紧凑的特点,为光阱的微调和对齐提供了显著的灵活性。利用这一透镜,该研究团队采用 $NA = 0.6$ 的超构透镜进行了二维粒子操纵,并成功地对在水中悬浮的聚苯乙烯(polystyrene, PS)粒子实现了“META”形状的排列。而 Shanei 等^[102]同样采用几何相位超构表面设计,实现了通过一维相位梯度聚焦光束进行粒子的定向输运。然而,由于该超构表面对偏振的敏感性,只有特定偏振的光能够被有效地调制,从而导致整个系统在高功率激光照射下的光利用率相对较低。为了优化光镊系统的集成度,Plidschun 等^[103]提出了在光纤集成超高数值孔径(NA)的超构表面,以实现更加紧凑的光学捕获系统。这种设计方案不仅提供了对微米尺度粒子和细菌的稳定三维光学夹持能力,同时也显著降低了整体成本,并实现了与现有光纤系统的高度兼容性。而对于复杂的三维粒子操纵,Kuo 等^[104]采用由 GaN 圆形纳米柱构成的立方相位超构表面,生成了具有垂直加速性质的二维 Airy 光束。这种光束具有高强度梯度和特殊的传播特性,能有效地实现粒子群的三维操纵。此外,Xiao 等^[105]于 2022 年报道了一种用于芯片级光学捕获应用的反射型超构表面。该超构表面具有 NA 大于 1 和高捕获刚度的优点,其性能与同等 NA 的传统显微镜物镜相当,但体积显著减小。由此可见,超构表面光镊技术不仅能够实现对微小颗粒的精确操纵,还具有体积小、易于集成和高度灵活的优势,为未来光镊的广泛应用提供了新的可能性。

4.2 多功能超构微操控器件

超构表面光镊由于具有体积小、精度高的优势,在紧凑光学平台的优势显而易见,然而在多维度光场调控中,与空间光调制器等可调谐器件相比,微加工制备过程中一旦完成,整个样品所加载的相位即已固定,无法进行功能上的切换,这严重限制了超构表面光镊的多功能性发展。因此,开发并应用基于超构表面的多维度光场调控技术显得尤为重要。2018年,Markovich 等^[106]利用包含重叠的纵向、横向和交叉的金属纳米天线,实现了对正交线偏振光的双焦点透镜。如图 3(a)

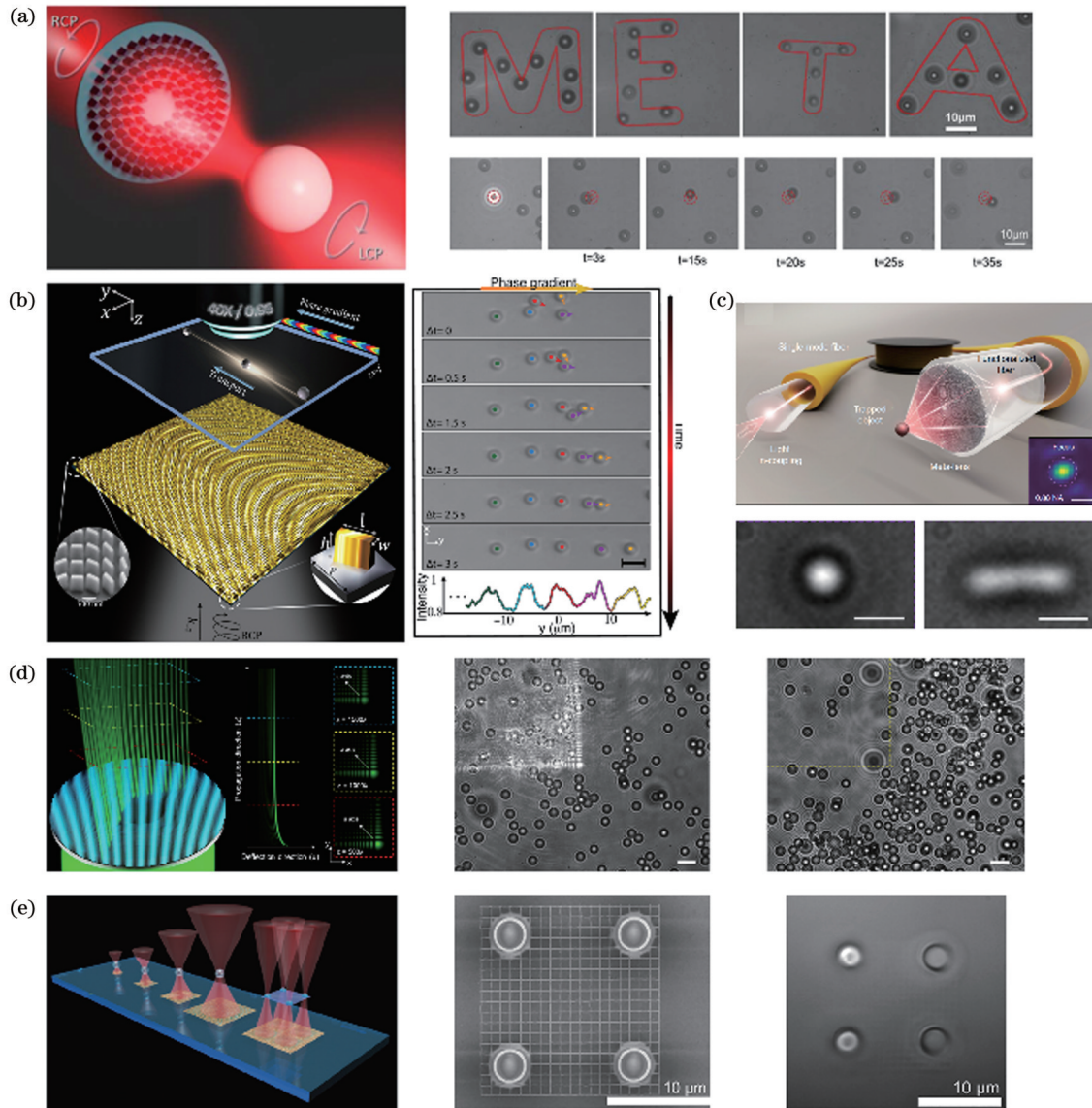


图 2 几种超构表面光镊。(a)基于几何相位的超构表面光镊^[101];(b)基于几何相位的光学传送带^[102];(c)超构表面辅助下的光纤光镊^[103];(d)基于GaN传播相位的Airy结构光镊^[104];(e)基于几何相位的反射型全息光镊^[105]

Fig. 2 A few types of metasurface-based optical tweezers. (a) Geometric phase-based metasurface optical tweezers^[101]; (b) geometric phase-based optical conveyor belt^[102]; (c) optical fiber tweezers with metasurface assistance^[103]; (d) GaN propagation phase-based Airy structured optical tweezers^[104]; (e) geometric phase-based reflective holographic optical tweezers^[105]

所示,通过改变入射光的线偏振态,可以在两个焦点间对微米量级聚苯乙烯微球进行连续转移,并利用粒子追踪算法对两个焦点的光学捕获刚度进行了定量分析。该双焦点超透镜展示了一种利用偏振控制沿光轴方向操纵微粒的新方法,可望应用于集成光流控芯片。2021年,Li等^[107]提出了一种单层介质超构表面设计方案,实现了光镊与光扳手的完美集成,如图3(b)左侧所示。区别于Markovich等的方法,Li等证明,通过结合传播相位与几何相位,可以灵活解耦含有SAM的圆偏振光所携带的相位。这一策略的核心在于,通过精细调控超构表面上每个位点的纳米柱的尺寸、形态和旋转角度,从而使得正交圆偏振态所携带的相位得到完全解耦,进而生成任意所需的光场。此外,他们还

创新地提出,在共轴的不同距离上产生具有高NA的聚焦光场与带有螺旋相位的涡旋光场。为了验证这一设计的实用性,他们详细计算了在半径为 $R=8\mu\text{m}$ 的样品面上,能够在 $z=6.5\mu\text{m}$ 处高效捕获PS颗粒,并在 $z=10.5\mu\text{m}$ 处稳定地捕获并旋转颗粒。2022年,Li等^[108]将这一方案付诸实验,他们用类似原理在实验上展示了聚焦光束对粒子的捕获和拖拽功能,对于具有双折射特性的 CaCO_3 颗粒,SAM赋予微粒自转的功能,切换偏振态后,生成的聚焦涡旋光束会传递OAM使颗粒做轨道运动,如图3(c)所示。与早期的超构表面光镊相比,Li等^[107-108]的设计不仅能实现更为复杂的多维光操作功能,提高样品的处理效率,而且也微尺度光操纵技术开辟了一种具有多功能性的全新设计途径。

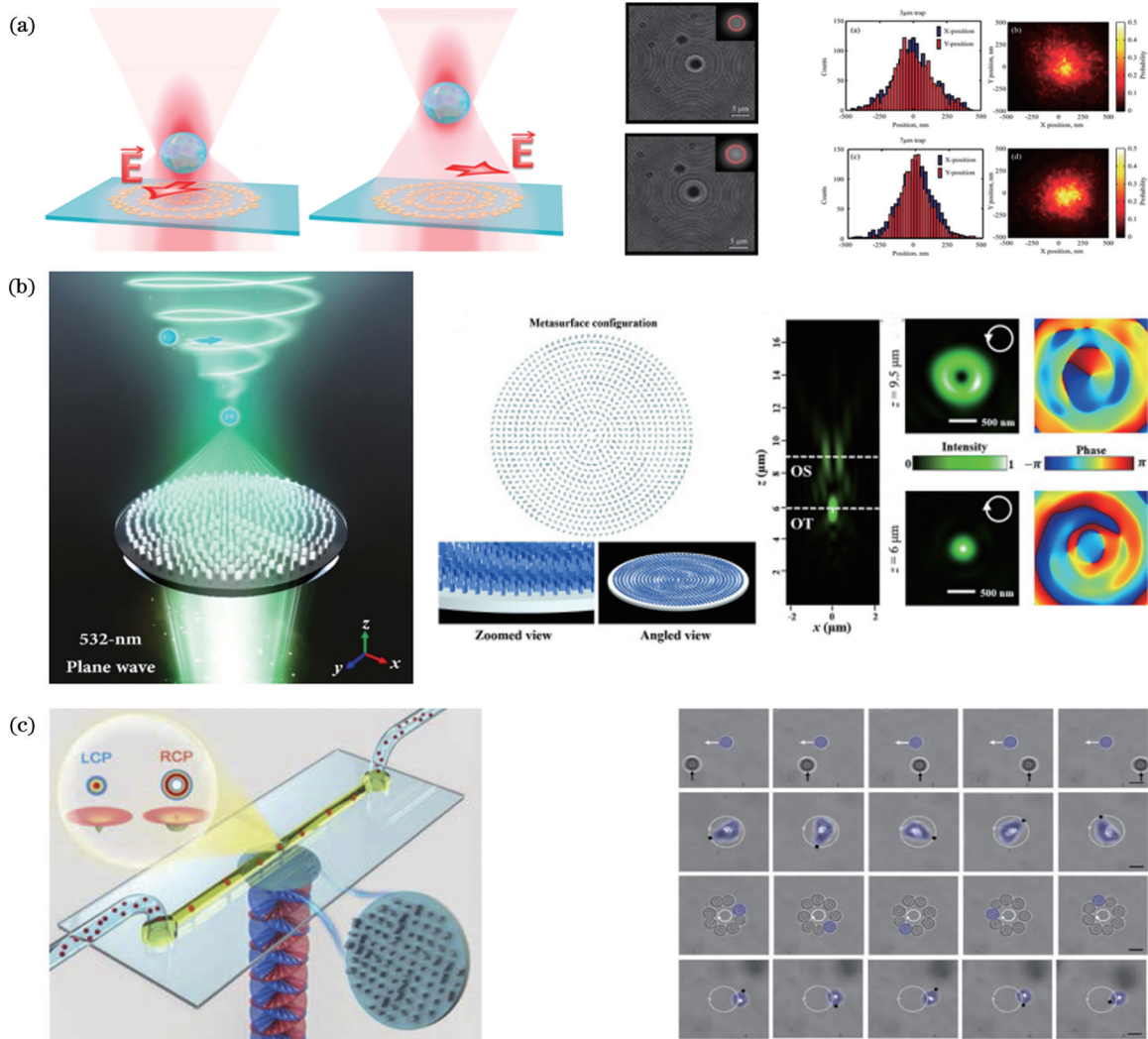


图3 多功能超构表面微操控器件。(a)基于双焦点的超构表面光镊^[106];(b)基于复合相位的多维度集成光镊-光扳手^[107];(c)多功能超构表面微操控器件^[108]

Fig. 3 Metasurfaces-based multifunctional micro-manipulation devices. (a) Metasurface optical tweezers based on bifocal points^[106]; (b) multidimensional integrated optical tweezers-optical spanners based on composite phase^[107]; (c) multifunctional metasurface micro-manipulator device^[108]

4.3 超构表面真空光镊

传统光镊系统的工作环境在液体条件下,适用于操纵较大的生物样本,如细胞和蛋白质,其操纵过程可能受到溶液环境的阻力和样品生物活性的影响。真空光镊则主要操纵原子、分子和纳米颗粒,常用于悬浮光学、量子物理和原子间相互作用的精确测量^[109-112]。其在真空环境下可以实现更高的操作精度并抑制背景气体导致的布朗运动^[21,113-118]。为了精确操控原子的行为,使原子冷却,通常使用磁光阱(MOT)技术来捕获和囚禁原子簇^[119]。基本原理为:激光束在径向上的旋向性与轴向上的旋向性相反。进入激光束交叉区域的原子被减慢,位置相关的力将冷原子推向陷阱中心。然而,产生预想圆偏振激光以及控制激光传播方向等需要占用很大的空间。为了实现集成的冷原子制备装置,单束激光的MOT设计得到了高度关注。尽管此前的单光束MOT系统已有很多进步,但仍存在捕获

原子区域不对称、光能利用率低等问题,从而限制了其在量子存储和传感领域的应用,此外,冷原子制备装置的小型化、集成性和可扩展性一直被传统光学系统中的大量光学元件(如分束器、透镜、反射镜等)所阻碍,而对光在亚波长尺度有精确调控的超构表面芯片有望解决这一问题。2020年,Zhu等^[120]提出了利用超构表面冷却和囚禁冷原子的芯片方案。此项工作的超构表面设计是基于纯几何相位的设计方案,由非晶硅天线阵列组成的 $599.4\ \mu\text{m} \times 599.4\ \mu\text{m}$ 的超构表面在法向入射下,圆偏振光可以分成具有相同强度的5束交叉圆偏振光束。其中一个沿入射方向传播,而其他4个光束分别向 $\pm x$ 轴和 $\pm y$ 轴偏转,与入射光束成 22.5° 角。图4(a)左侧为超构表面光学芯片的MOT的实验配置。在实验中,经过超构表面后的激光束被转换为正交的圆偏振,即从左旋圆偏振到右圆偏振。然后,4个衍射光束被4个反射镜反射,将圆偏振改变为左旋,反

射的中心光束在通过四分之一波片两次后保持右旋圆偏振。铷原子束则从实验装置的后方入射进入系统中, MOT 通过反转激光对的旋向性和线圈电流方向来冷却和捕获铷原子, 如图 4(a) 右侧所示。2023 年, 他们将超构表面样品扩大到了厘米尺度^[121]。2022 年, Hsu 等^[122]提出了另一种单原子捕获方案[图 4(b)], 利用两个声光偏转器产生多个输入光束, 实现了利用 $NA = 0.55$ 的超透镜制备原子阵列, 表征了样品的视场范围约为 $\pm 11 \mu\text{m}$ 。

针对捕获多原子势阱的需求, 2023 年, Huang 等^[123]受传统全息光镊的启发, 设计和制作了基于二氧化钛超构表面, 适用于制备钙 87 原子阵列, 如图 4(c) 所示。他们在实验中演示了各种几何结构的光阱阵

列, 包括周期阵列和非周期准晶体阵列, 从一维到三维, 每个阵列可达几百个光学陷阱, 而后对生成的光阱进行了表征, 评估了光阱的定位精度、大小和强度均匀性以及超构表面样品的功率负荷能力。与传统的声光衍射器和液晶光栅相比, 超构表面可以产生任意阵列几何结构, 具有体积小、无需外加电源、光学效率高和产生大规模高质量阵列的可扩展性等优点。

针对悬浮光力学与超构表面的交叉领域, Shen 等^[124]报道了使用超构表面在真空中实现片上光学悬浮的首次实验, 如图 4(d) 所示。他们设计并制作了一个高数值孔径 $NA = 0.88$ 的硅纳米天线组成的微结构, 在 2×10^{-4} torr (1 torr = 133.322 pa) 真空度下实现了纳米粒子的光学悬浮, 且没有反馈冷却, 改变激光功

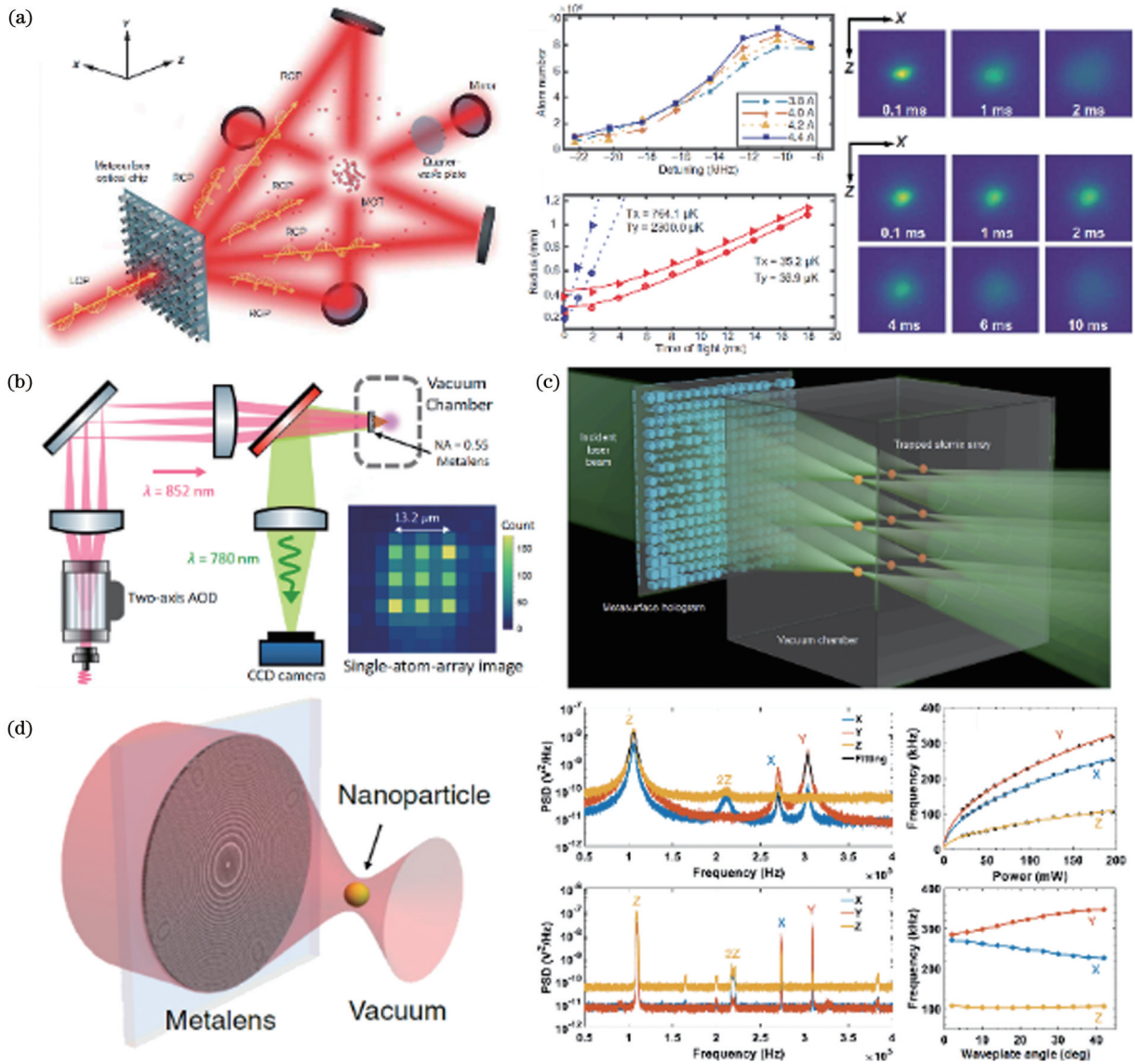


图 4 几种超构表面真空光镊。(a)几何相位超构 MOT^[120]; (b)、(c)超构全息光镊捕获单原子阵列^[122-123]; (d)真空超构表面光镊捕获纳米颗粒^[124]

Fig. 4 A few types of metasurface-based vacuum optical tweezers. (a) Geometric phase metasurface magneto-optical trap (MOT)^[120]; (b), (c) metasurface holographic optical tweezers trapping single atom array^[122-123]; (d) vacuum metasurface optical tweezers trapping nanoparticles^[124]

率和偏振可以调谐悬浮频率。在实验上,基于超构表面和物镜分别实现了在两个间距约 $1.5 \mu\text{m}$ 的光学镊子间的悬浮纳米粒转移。与传统的大体积物镜相比,超构表面可以工作在更极端的条件下,也为创造复杂的光阱提供了更大的灵活性。

4.4 超构表面光学牵引力

物体在入射光的作用下,通常会被向前推进,然而十多年前,Chen 等^[125]的研究发现,在特殊光场的作用下,物体会被光拉向它的来源方向。这被称为光学拉力或者光学牵引力,由此衍生而来的一些出乎意料的光力学行为,例如负转矩和侧向力,为操纵技术增加了新的维度,并促进了该领域的新突破^[126-128]。然而光学牵引力由于其极为苛刻的条件而难以实现。基于此,超构表面强大的调控能力为实现光学牵引力创造了条件。2015年,Pfeiffer 等^[129]设计了同心环的硅基超构表面,平面波入射后超构表面会生成两束分别为 +1 阶和 -1 阶线偏振 Bessel 光束的叠加光场,实现了对粒子的牵引,如图 5(a) 所示。计算结果表明,这种器件在中心波长 $\lambda_0 = 1.5 \mu\text{m}$ 入射下可以将 750 nm 直径的 PS 小球拉到与 Bessel 光束的非衍射范围相等的距离。这种方案仍然是对光的相位进行调控。利用双曲超构

材料实现光学牵引力可以更为简单地实现这一功能,如图 5(b)~(d) 所示。通过设计双曲超构材料操控其色散关系,允许波矢的某些分量大于光的自由空间波矢,从而达到可操控的异常反射,以实现粒子的光学牵引。Ivinskaya 等^[130]首先提出了使用双曲超材料为辅助衬底辅助操控颗粒的模型,实现了更好的空间局域化和更低光学功率下的粒子捕获。其高电磁态密度有利于改变粒子的散射特性,从而控制光力方向。当金属作为顶层时,短程表面等离激元可以增强光学牵引力,而多层结构带来宽带、可调谐的负向光学力。与仅利用金属表面等离激元共振的衬底相比,双曲超材料具有宽带响应、可调谐频谱位置以及对损耗金属也有较大负向力等新特性。随后, Jin 等^[131]用类似的模型分析了两种产生牵引力的机制,即超材料的凹形等频率曲面增加前向线动量,从而激发定向表面等离激元,且不受入射角度的影响,可实现宽带操控。而 Kostina 等^[132]则分析了反射系数与改变粒子偶极子方向的关系,证明了调整结构参数后,通过改变入射波长或角度,可以在推力和拉力之间进行切换,从而可以在任意光谱范围内控制光力,实现对常规方法难以分离的纳米粒子的精确分选。

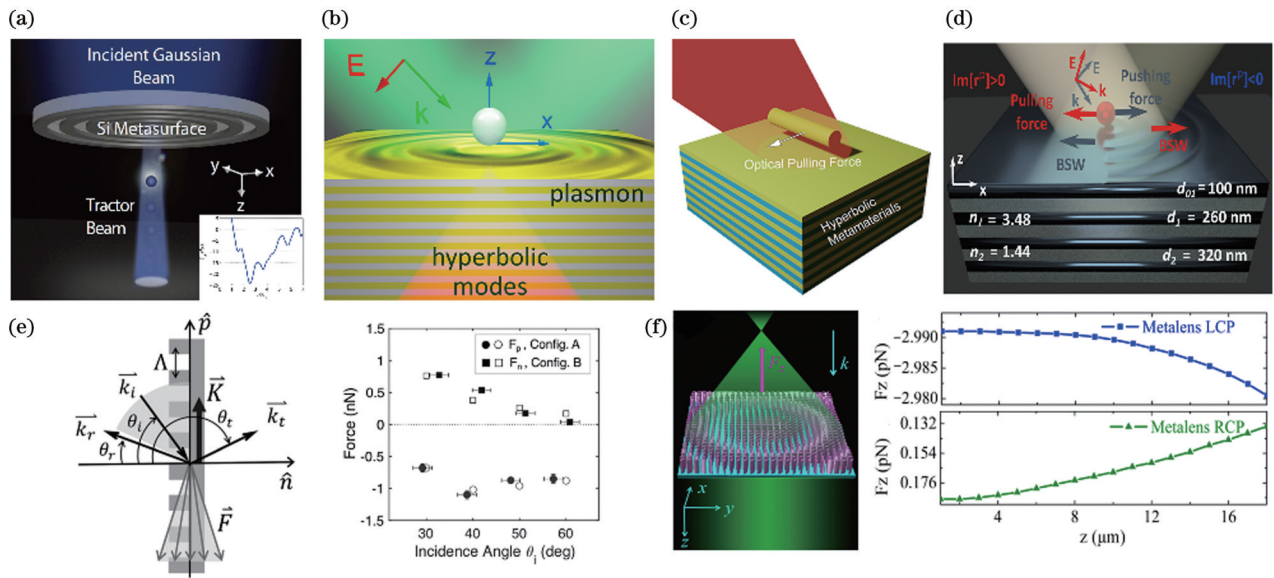


图 5 超构表面实现光学牵引力。(a)同心环超构表面实现拖拽颗粒^[129]; (b)、(c)、(d)双曲超构材料辅助实现光学牵引力^[130]; (e)衍射光栅上的光学牵引力^[131]; (f)几何相位超构表面实现牵引力和推进力的切换^[132]

Fig. 5 Optical pulling force achieved by metasurfaces. (a) Particle dragging achieved by concentric ring metasurface^[129]; (b), (c), (d) optical pulling force facilitated by hyperbolic metamaterials^[130]; (e) optical pulling force on diffraction grating^[131]; (f) Switch between pulling and propulsion forces achieved by geometric phase metasurface^[132]

由于光学牵引微粒需要通过施加的外部光场控制物质的散射方向,因此之前介绍的工作都需要对光场进行整形。然而,通过定制操纵物体的结构也能实现对物体的牵引。研究者们探究了衍射光栅的辐射压力,验证了衍射光栅动量与机械动量之间的对应关系。如图 5(f) 所示,Chu 等^[133]提出衍射光栅会产生与衍射束动量变化相对应的机械反作用力,他们推导了

与光栅周期、衍射阶数相关的光栅平行和垂直于表面的辐射压力表达式,并设计了真空扭摆装置,分别在 808 nm 和 447 nm 波长下测量了光栅的辐射压力分量,验证了平行于光栅的辐射压力与衍射阶数成正比,与衍射光栅动量成正比,表明光栅不同于简单反射面只有法向力,还可以提供额外的切向辐射压力。而如图 5(e) 所示, Peng 等^[134]利用几何相位对偏振的敏感

性将发散的高斯束转换为准直的高斯束,使得输出光场的动量在传播方向聚集,大于输入光场在传播方向的投影,由于动量守恒,几何相位超构表面获得了光学牵引力。同时由于几何相位调控相位的共轭性,入射不同的圆偏振光可控制轴向力的方向,得以实现光学牵引力与推进力的切换。

5 基于拓扑物理的光力效应

拓扑光子学是近年来迅速崛起的一个研究领域,它继承于凝聚态中的拓扑物理,主要研究光在人工微结构中的传播特性,特别是在存在拓扑缺陷或边界的系统中^[135-138]。与前文提及的超构表面光场调控不同的是,拓扑光子学的焦点在于整体的系统特性和拓扑性质,如鲁棒性和无损失的边界传输。这使得在微结构上存在其他微粒、杂质或结构缺陷的情况下,光仍然可以定向、无损失、无反射地沿着界面或边缘传播。因此,拓扑光子学为设计和实现更为复杂的光学微操控

行为提供了全新的环境和方法。

5.1 基于光学拓扑绝缘体的微操控

早在 2015 年, Wang 等^[139]首次提出了一个基于单向拓扑边缘态的光学牵引力的概念。如图 6(a)所示,他们巧妙地通过光子晶体波导设计,并选择合适的入射模式,实现了沿波导前进方向的光学牵引力,它来源于两个共存单向模式之间的动量差异。该设计能够避免受到波导结构的影响,并使得粒子不受其形状和介电常数的约束。相较于在自由空间中实施的光学牵引力方法,该方法免除了对入射光场的结构化处理的需求。精妙的微纳结构设计还使得粒子能够顺利通过 90° 的弯曲路径,为大尺寸或高介电常数的粒子提供更大的牵引力。如图 6(b)所示,2020 年, Li 等^[140]的研究进一步提出了利用调节光子晶体动量空间中频率曲面形状(称为光动量拓扑)来产生平面波的牵引力效应。这种方法的核心是物体在特定的光动量拓扑条件下将光散射到轴外方向,从而实现向

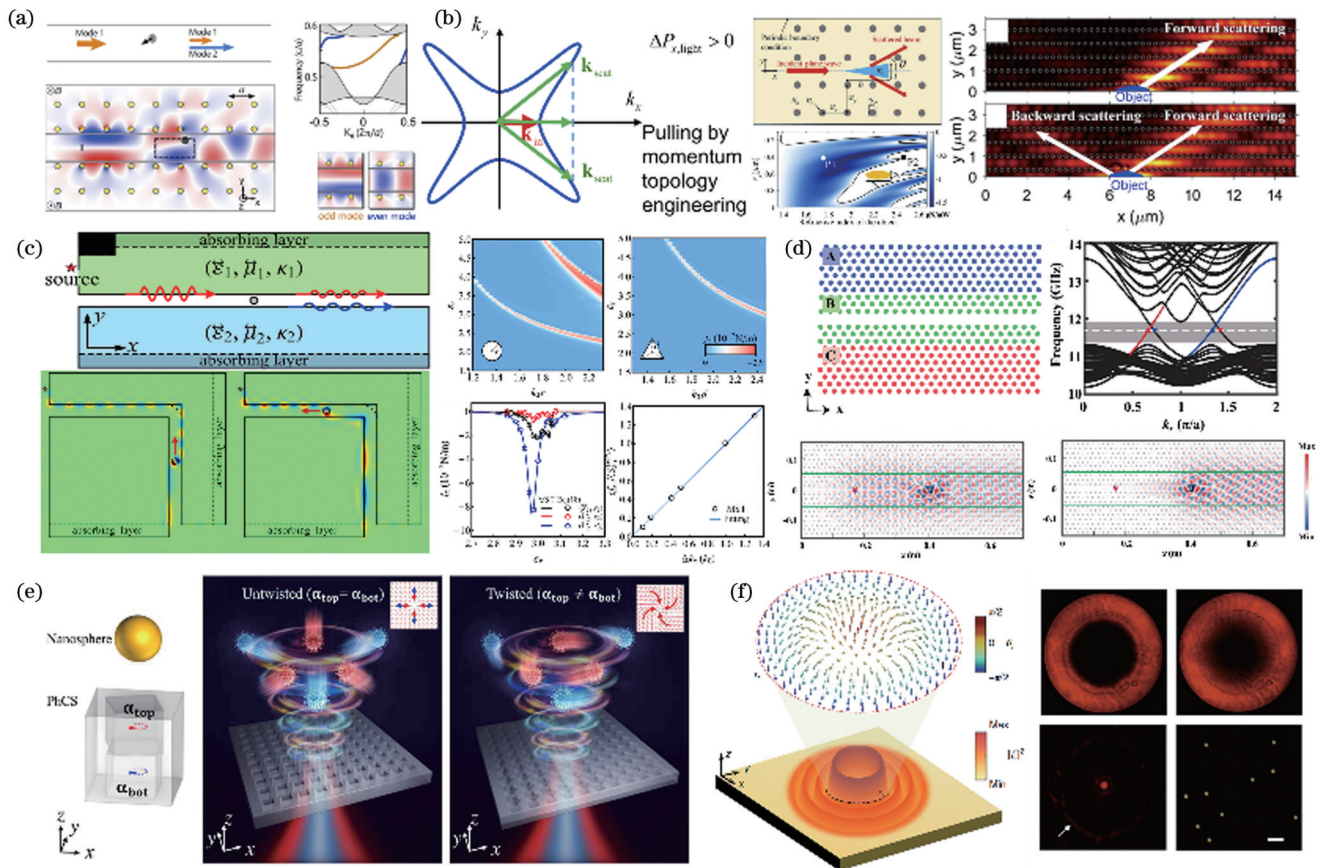


图 6 基于拓扑光学的光学微操纵。(a)基于四方晶格的拓扑光子晶体波导实现光学牵引力^[139]; (b)动量拓扑实现光学牵引力^[140]; (c)拓扑超构材料实现光学牵引力^[141]; (d)基于六角晶格的光子晶体波导实现光学牵引力^[142]; (e)双层光子晶体诱导的拓扑 BIC 光力^[146]; (f)光力实现斯格明子拓扑态探测^[147]

Fig. 6 Optical micro-manipulation based on topological photonics. (a) Optical pulling realized with topological photonic crystal waveguide based on square lattice^[139]; (b) optical pulling achieved through momentum topology^[140]; (c) optical pulling achieved with topological metamaterials^[141]; (d) optical pulling realized with photonic crystal waveguide based on hexagonal lattice^[142]; (e) topological BIC optical force induced by bilayer photonic crystal^[146]; (f) optical force enabled detection of Skyrmion topological state^[147]

光源方向的牵引。如图 6(c) 所示, Wang 等^[141] 在其 2022 年的研究中, 进一步探讨了在由两个手性超材料构成的超构波导空气槽中产生的光学牵引力。这种牵引力的产生是基于两个拓扑保护的手性表面波之间的波数差异, 它显示出与粒子的形状、材料和大小无关, 且对频率具有鲁棒性。同年, Qu 等^[142] 则采用了由六角形光子晶体区域和两个磁化光子晶体区域组成的异质结构, 如图 6(d) 所示, 为微粒提供了大范围且灵活的电磁操作机会。这种设计的核心在于其内部存在的两种共传向的拓扑性单向波导态。这些模式允许进行复杂的动力学操作, 如拉动或推动粒子, 并能针对不同材料的粒子进行分选。由此可见, 拓扑光子绝缘体的定向能流会覆盖颗粒本身的散射, 从而达到灵活操控的目的。

5.2 基于连续域中拓扑束缚态的微操控

除了类比于凝聚态系统中的拓扑绝缘体, 连续域中的束缚态(BIC)同样代表了一种具有拓扑性质的电磁本征态^[143-144]。区别于传统的局部化模式, BIC 在频率-波矢图上奇特地位于辐射连续域, 也即光锥范围内。尽管其频率明确地落在这一连续域中, BIC 却显示出完全的局部化特性, 其中的电磁波能量被完全束缚并局限在介质或结构中, 不会向外部辐射。这一非辐射特性赋予了 BIC 非常高的品质因子 Q 。为了研究其拓扑特性, 可以将能量写为布洛赫波的形式, 对于位于光线以上的共振态(泄漏模式), 在衍射限以下, 唯一非零的传播波振幅是 $u(k)$ 的零阶(在平面内恒定)的傅里叶分量, 即 $\mathbf{c}(k) = c_x(k)\hat{\mathbf{x}} + c_y(k)\hat{\mathbf{y}}$, $c(k)$ 是 $u(k)$ 在 x - y 平面上的投影, 它指示着该共振态在远场中的偏振方向, 故将 $c(k)$ 称为“偏振矢量”。当 $c_x = c_y = 0$ 时, 共振态变为 BIC。也就是偏振矢量 $c(k)$ 消失, 表示 BIC 不能辐射。BIC 对应的 k 点就是 $c(k)$ 的零点, 成为动量偏振空间的旋涡中心。通过 $c(k)$ 的旋转次数可以定义 BIC 的拓扑电荷, 表征 BIC 的拓扑性质。因此, BIC 可以被看作远场辐射偏振方向的旋涡中心, 因此围绕中心可以定义其拓扑荷数, 即沿着 k 空间中的一个封闭路径围绕 BIC 的绕数。这一绕数是整数, 其正负表示旋转的方向。当系统参数连续变化时, 偏振矢量空间中奇点的总和沿着封闭路径保持不变, 因此, 拓扑电荷守恒严格地限制了 BIC 如何形成、如何演变以及如何湮灭^[145]。然而在实际中由于微结构制备工艺存在误差, 被观测到的更多的是准 BIC 情况, 它们与真正的 BIC 非常接近, 但由于对称性或干涉条件的轻微破坏, 它们可能会显示出有限的辐射泄漏。基于以上原理, 如图 6(e) 所示, Qin 等^[146] 首次将具有 BIC 性质的平面微结构与光力相结合, 在上下两层光子晶体结构中利用 BIC 的特点, 在动量空间中获得了力的零点拓扑分布。力的拓扑分布与偏振向量在 BIC 附近的漩涡分布类似, 力向量围绕力的零点旋转, 可以用力的拓扑荷数描述。通过合理设计, 可以获得会聚和发散的力

拓分布, 实现对纳米粒子的吸引和排斥, 还可以获得涡旋状的力场分布, 以及在 off- Γ 点处 BIC 情况下产生的多个力零点。

5.3 光学微操控用于拓扑物态探测

光学斯格明子代表了电磁场中的一种稳定的拓扑准粒子态, 其特征在于其向量场展现为三维纺锤状结构。这种结构, 由于其与磁性材料中的斯格明子相似性, 使得它的拓扑属性可以用斯格明子数来描述。基于电磁场的各种性质, 可以将光学斯格明子分为不同类别, 例如 Neel 型斯格明子、布洛赫斯格明子以及斯托克斯斯格明子, 它们各自对应着不同的电磁场向量模式。尽管这些复杂的向量场在实验探测上具有挑战性, 但可以间接地通过研究光场与纳米颗粒之间的互动来感知其拓扑状态。如图 6(f) 所示, Du 等^[147] 采用等离激元超构表面产生带有轨道角动量的倏逝波。通过观察纳米颗粒的动态, 他们观测到了一个表现为 Neel 型斯格明子态的自旋矢量分布, 其中自旋矢量在空间径向方向上从向上(或向下)的态逐渐转变为向下(或向上), 这完全取决于光学旋涡的旋转方向。然而, 在紧聚焦条件下的光学旋涡场中, 其自旋矢量分布呈现出布洛赫型斯格明子的特征, 即自旋矢量沿空间角向方向发生变化。值得注意的是, 在斯格明子内部, 偏振的变化是极其剧烈的。并且, 由于这种装置的近场特性, 其偏振分布的半峰全宽已经超越了衍射限制, 达到了小于 10 nm 的精度, 从而揭示了由自旋能流定义的光学斯格明子的深度拓扑状态。

6 光驱动的人工微纳机械

以上几节内容讨论了通过超构表面调制的光场与微观物体之间的相互作用所带来的效果。尽管与传统的光学微操控系统相比, 它在紧凑性和操控精度上都所有进步, 但其物理现象和运动行为仍然受限于传统理论的框架。本节, 将进一步阐述当光照射到超构表面时产生的辐射压会对超构表面产生反作用力。通过巧妙地设计散射场, 可以对这种反作用力进行控制, 从而创造出与微纳米球或微纳米棒完全不同的微操纵效果, 且不受制于入射光场的特性。这进一步打开了光学超控的新篇章。

6.1 光驱动的金属表面等离激元微结构

金属超构材料的工作原理主要基于表面等离子体极化激元, 通常简称为表面等离激元(SP)。这些等离激元是金属纳米结构受光照射时与导电电子相互作用产生的表面电荷振荡现象。当金属纳米结构(例如由金或银构成)受到光照射时, 其中的自由电子会被激发, 形成振荡。在特定的频率下, 这些电子的振荡与入射光的电磁波达到共振, 引发强烈的电子云振荡, 这种特定现象被称作“表面等离子共振(SPR)”。得益于这些等离激元, 当光照射到金属纳

米结构时,它会在结构表面形成高度集中的局部电场,从而产生的光强极大地超过入射光。通过精心设计金属结构的形态,研究者可以操纵光的散射方向。作为例证,光学马达是基于光驱动的等离激元结构中的一个简单实例。2010年,Liu等^[148]使用等臂“四叶草”形的等离激元纳米结构作为马达,在线偏振光的作用下,实现了其旋转运动,如图7(a)所示。这种驱动机制完全基于能量和角动量守恒,而无须预设光的角动量或改变其偏振状态。通过调节入射光的波长,激发“四叶草”形结构的特定等离激元模式,可以产生不同方向的驱动扭矩,进而调控马达的旋转方向,实现一个仅100 nm大小的等离激元马达驱动一个2.2 μm的硅微盘旋转,多个马达的组合可以进一步增大驱动力矩。这种方法展现了使用纳米等离激元结构与光

之间的强相互作用产生机械扭矩的潜力。10年后,Tanaka等^[149]设计了一个由长短不一的金属棒组成的周期性阵列,如图7(b)所示。在线偏光入射下,由于其特有的方向性侧面散射,该结构可以产生波长依赖的侧向光学力。据此,Wu等^[150]设计了一个由三根金属棒构成的马达,并将其置于圆形基底的四个角上,如图7(c)所示。类似于无人机的工作原理,通过三根金属棒在830 nm和980 nm两个不同波长下不同的散射模式,实现了2.5 μm大小的结构在平面内的任意平动和旋转。利用微纳等离激元结构与光的相互作用,可以产生强烈的局部电场并控制光的散射方向,不仅体现了微纳光学在驱动和控制物体运动方面的巨大潜力,而且为未来的微型机器人研发开辟了新的可能性。

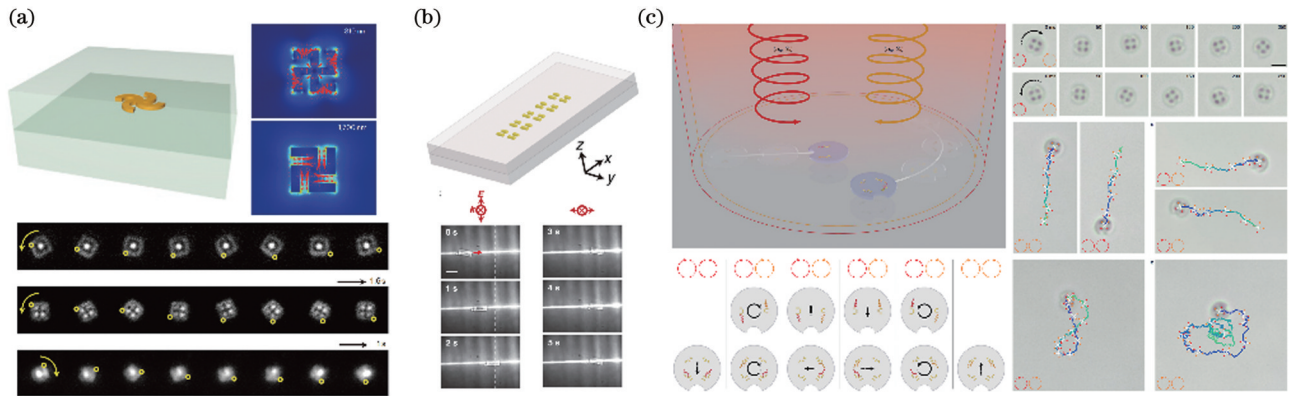


图7 光驱动的金属表面等离激元微结构。(a)表面等离激元光马达^[148]; (b)表面等离激元光马达诱导光学横向力^[149]; (c)光学微型无人机^[150]

Fig. 7 Light-driven metallic surface plasmonic microstructures. (a) Surface plasmonic optical motor^[148]; (b) optical transverse force induced by surface plasmonic optical motor^[149]; (c) optical micro-drone^[150]

6.2 光驱动的介质超构机械

与金属表面等离激元效应诱导的光学并行的是基于介质材料的超构机械的兴起。如图8(a)所示, Magallanes和Brasselet^[151]利用在玻璃上刻制的带有相位梯度的几何相位,成功实现了圆偏振光诱导的光学侧向力。继而,他们通过设计四个辐射方向各有不同相位梯度的超构表面,展现了在宏观层面可观察的光学扭矩。不过,他们所产生的扭矩是基于仔细设计的元件结构和相位梯度,且受到结构设计的制约。2021年,Andr n等^[152]提出了一个新颖的概念——“超构跑车(metavehicles)”。如图8(b)所示,他们创新性地设计了一种对平面偏振光高度敏感的超构光栅(OGM)。这种设计能够利用折射光产生的反冲力推动光栅前进,并且,当入射光为圆偏振时,它会向超构光栅传递SAM,从而赋予光栅转向的能力。Qin等^[153]采用调整纳米柱间距产生的法诺共振,通过微调结构参数来改变共振峰的位置,实现了基于BIC的超构跑车,如图8(c)所示。但该方法仍属于光栅类别,缺乏切换自由度以调整光的偏折方向,因此它不能像人类日常

使用的车辆那样实现“倒车”功能。因此,在2023年,Li等^[154]进一步完善了这一概念,实现了一个全功能版的超构跑车。他们巧妙地利用了介质材料的双折射特性,构建了一个对平面偏振光和竖直偏振光都高度敏感的相位梯度超构表面(PGM),如图8(d)所示。这种设计不仅可以完全实现超构跑车在二维平面内的所有运动:前进、后退、左转和右转,而且由于该器件的衍射级次在零级,其工作模式更为高效。

超构机械的应用远不止于此。它不仅能在液体环境中工作,在真空环境下也同样有着令人瞩目的表现。Ilic等^[155]在研究微结构在真空中的浮力动力学时,开发了一种被称为“被动自稳定超构表面(MEPS)”的设计,如图8(e)所示。这种设计能够产生非对称的散射响应。他们通过仿真与理论分析揭示,由于MEPS元件的非对称响应特性,当物体相对于激光束产生倾斜或偏移时,会产生一个回归的力矩,帮助物体回到原始的平衡位置。这为实现物体在激光束中的自稳定操控提供了可能。此外,利用多个MEPS的组合,可以实现对物体多个自由度的稳定控制。这种技术对于操纵

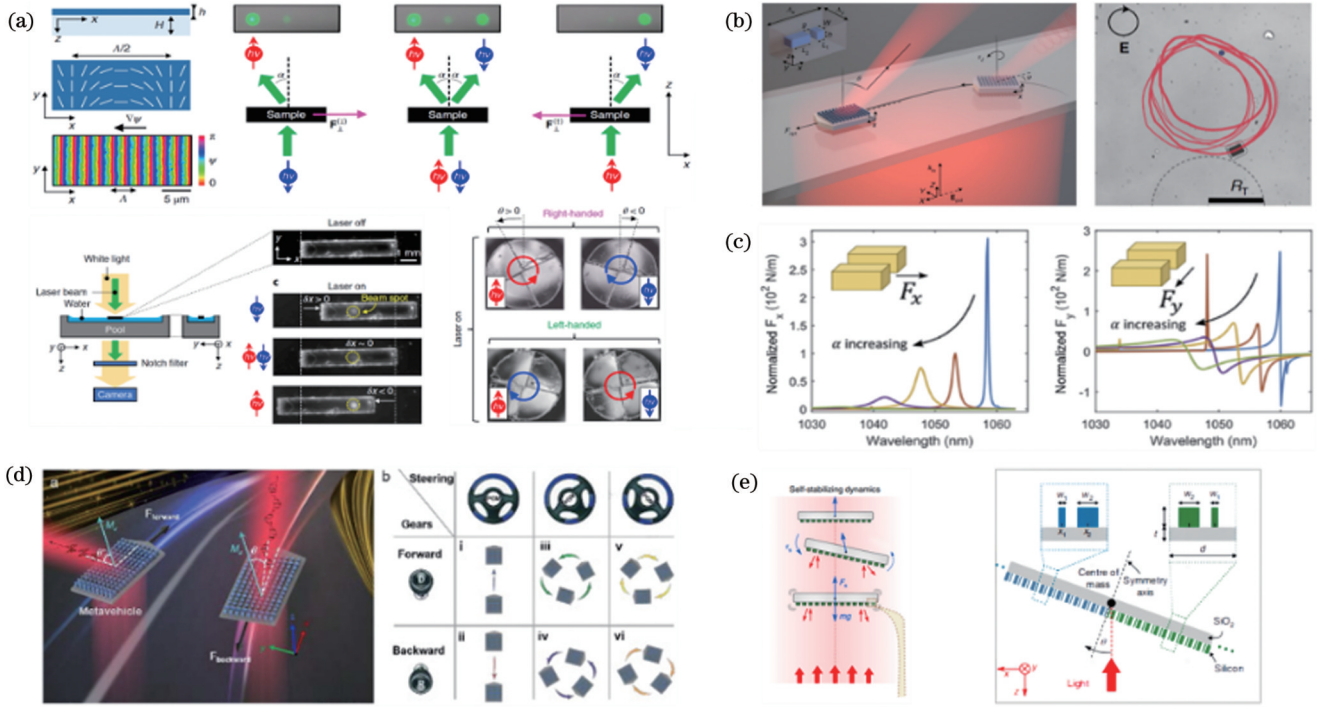


图8 光驱动的介质超构机械。(a) SiO₂基的几何相位超构表面诱导光学自旋相关横向力和负力矩^[151]；(b)基于OGM的超构跑车及其实验结果^[152]；(c)基于OGM的BIC超构跑车^[153]；(d)全功能的介质超构跑车及其理论结果^[154]；(e)真空中超构表面的光悬浮^[155]

Fig. 8 Light-driven dielectric metamechanics. (a) SiO₂-based geometric phase metasurface induces optical spin-related transverse force and negative torque^[151]; (b) metavehicle based on OGM and its experimental results^[152]; (c) BIC metavehicle based on OGM^[153]; (d) fully functional dielectric metavehicle and its theoretical results^[154]; (e) photonic levitation of metasurfaces in vacuum^[155]

从毫米到米尺度的宏观物体具有巨大潜力,尤其是在太空环境中应用于太阳能帆板方面。

7 结 论

本文综述了基于超构表面的光学微操控领域的前沿进展。从电磁机制的基本原理出发,讨论了在计算光学力和光学扭矩时所遵循的基本原则。探讨了超构表面的核心物理机制,详细解析了共振相位、几何相位、传播相位及绕行相位的物理机制。概述了一系列基于超构表面的微操控器件,如超构表面光镊、多功能超构微操控器件、超构真空光镊等。此外,对拓扑光子学效应如何被用于微操控策略进行了探讨,包括基于光学拓扑绝缘体和基于连续域中拓扑束缚态的微操控,以及如何运用微操控技术探测新奇拓扑现象。由于超构表面的尺寸处于微米级别,其本身也具有被光场驱动以产生机械运动的能力,由此衍生出一系列人工微型机器,包括光驱动的金属表面等离激元微结构和介质超构机械两大类,这为构建新一代的光驱动微机器人提供了可能,也是今后这个领域发展的热点方向。

展望未来,超构表面微操纵技术有望朝着更高的时间分辨率、更高的空间精度、更低的操控功率方向迈进。为此,对超构表面的底层设计方案和实验制备

标准提出了更为迫切的要求。尽管超构表面的引入在微操作系统方面取得了一定的进展,显著缩小了体积,但在宽波段、多光学维度的响应以及器件阈值上仍存在着进一步开发和提升的空间。在微操作系统方面,超构表面的亚波长尺度结构将继续成为研究的关键焦点。尤其是在拓扑光操控领域,有望进一步扩展其研究范围,将非阿贝尔、非厄米^[156]和非线性效应^[29,157]与之结合,发现全新的物理现象。在生物和化学领域,超构光操控技术有望在更小的尺度上灵活运用,甚至达到对单分子水平的物体进行操控^[158-159]。这一技术还有望进一步应用在电池质检和靶向治疗等领域,为能源和生命科学的基础研究和实际应用带来变革。特别地,在发展超快光学领域方面^[160-162],超构表面正逐步展现出独特的优势。纳米尺度的超构光栅可以实现非常高分辨率的光谱测量,而非线性超构表面的设计可用于增强非线性效应或生成高次谐波,为实现高时间分辨的瞬态微操控技术提供了可能。总体而言,从传统光学微操控到超构操控的技术演变将继续推动微纳光学领域的蓬勃发展。这类技术范式不仅有助于满足各个基础研究领域的需求,而且将引领更多颠覆性的创新应用,为科学技术的发展开辟新的途径。

参 考 文 献

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288-290.
- [2] Gao D L, Ding W Q, Nieto-Vesperinas M, et al. Optical manipulation from the microscale to the nanoscale: fundamentals, advances and prospects[J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(9): e17039.
- [3] Gieseler J, Gomez-Solano J R, Magazzù A, et al. Optical tweezers—from calibration to applications: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(1): 74-241.
- [4] Otte E, Denz C. Optical trapping gets structure: structured light for advanced optical manipulation[J]. *Applied Physics Reviews*, 2020, 7(4): 041308.
- [5] Volpe G, Maragò O M, Rubinsztein-Dunlop H, et al. Roadmap for optical tweezers[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2023, 5(2): 022501.
- [6] 李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0101001.
Li Y M, Gong L, Li D, et al. Progress in optical tweezers technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0101001.
- [7] 梁言生, 姚保利, 雷铭, 等. 基于空间光场调控技术的光学微操纵[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026003.
Liang Y S, Yao B L, Lei M, et al. Optical micro-manipulation based on spatial modulation of optical fields[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026003.
- [8] 周源, 李润泽, 于湘华, 等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1123001.
Zhou Y, Li R Z, Yu X H, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1123001.
- [9] Gu M, Haumonte J B, Micheau Y, et al. Laser trapping and manipulation under focused evanescent wave illumination[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(21): 4236-4238.
- [10] Min C J, Shen Z, Shen J F, et al. Focused plasmonic trapping of metallic particles[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2891.
- [11] Wang X Y, Zhang Y Q, Dai Y M, et al. Enhancing plasmonic trapping with a perfect radially polarized beam[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 847-852.
- [12] Xie X, Wang X Y, Min C J, et al. Single-particle trapping and dynamic manipulation with holographic optical surface-wave tweezers[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(1): 166-173.
- [13] Zhao X T, Zhao N, Shi Y, et al. Optical fiber tweezers: a versatile tool for optical trapping and manipulation[J]. *Micromachines*, 2020, 11(2): 114.
- [14] Liu Z H, Guo C K, Yang J, et al. Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: fabrication and application[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12510-12516.
- [15] Bykov D S, Xie S R, Zeltner R, et al. Long-range optical trapping and binding of microparticles in hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 22.
- [16] Lin L H, Wang M S, Peng X L, et al. Opto-thermoelectric nanotweezers[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 195-201.
- [17] Zhang S L, Xu B R, Elsayed M, et al. Optoelectronic tweezers: a versatile toolbox for nano-/ micro-manipulation[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(22): 9203-9242.
- [18] 钟义立, 彭宇航, 陈嘉杰, 等. 光致温度场光镊: 原理及生物医学应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(14): 1400001.
Zhong Y L, Peng Y H, Chen J J, et al. Optical temperature field-driven tweezers: principles and biomedical applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(14): 1400001.
- [19] Linghu S Y, Gu Z Q, Lu J S, et al. Plasmon-driven nanowire actuators for on-chip manipulation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 385.
- [20] Killian J L, Ye F, Wang M D. Optical tweezers: a force to be reckoned with[J]. *Cell*, 2018, 175(6): 1445-1448.
- [21] Millen J, Monteiro T S, Pettit R, et al. Optomechanics with levitated particles[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, 83(2): 026401.
- [22] Xin H B, Li Y C, Liu Y C, et al. Optical forces: from fundamental to biological applications[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(37): 2001994.
- [23] 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.
- [24] Wang C Y, Yu Y, Chen Y, et al. Efficient quantum memory of orbital angular momentum qubits in cold atoms[J]. *Quantum Science and Technology*, 2021, 6(4): 045008.
- [25] Zeng J W, Albooyeh M, Rajaei M, et al. Direct detection of photoinduced magnetic force at the nanoscale reveals magnetic nearfield of structured light[J]. *Science Advances*, 2022, 8(45): eadd0233.
- [26] Chen X X, Wu T L, Gong Z Y, et al. Subwavelength imaging and detection using adjustable and movable droplet microlenses [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 225-234.
- [27] Yang Y J, Ren Y X, Chen M Z, et al. Optical trapping with structured light: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(3): 034001.
- [28] Jia Q N, Lyu W, Yan W, et al. Optical manipulation: from fluid to solid domains[J]. *Photonics Insights*, 2023, 2(2): R05.
- [29] Zhu Z, Zhang Y Q, Zhang S S, et al. Nonlinear optical trapping effect with reverse saturable absorption[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(4): 046006.
- [30] Nan F, Rodríguez-Fortuño F J, Yan S H, et al. Creating tunable lateral optical forces through multipolar interplay in single nanowires[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6361.
- [31] Shi Y Z, Xu X H, Nieto-Vesperinas M, et al. Advances in light transverse momenta and optical lateral forces[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2023, 15(3): 835-906.
- [32] Lu J S, Yang H B, Zhou L N, et al. Light-induced pulling and pushing by the synergic effect of optical force and photophoretic force[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(4): 043601.
- [33] Li H, Cao Y Y, Zhou L M, et al. Optical pulling forces and their applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(2): 288-366.
- [34] Chen H J, Zheng H X, Lu W L, et al. Lateral Optical Force due to the Breaking of Electric-Magnetic Symmetry[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(7): 073901.
- [35] Zhou Y, Zhang Y N, Xu X H, et al. Optical forces on multipoles induced by the helifante spin momentum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300245.
- [36] Xu X H, Nieto-Vesperinas M. Azimuthal imaginary Poynting momentum density[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(23): 233902.
- [37] Bekshaev A Y, Bliokh K Y, Nori F. Transverse spin and momentum in two-wave interference[J]. *Physical Review X*, 2015, 5(1): 011039.
- [38] Zhou Y, Xu X H, Zhang Y N, et al. Observation of high-order imaginary Poynting momentum optomechanics in structured light [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(44): e2209721119.
- [39] Zhu L H, Tai Y P, et al. Multidimensional optical tweezers synthesized by rigid-body emulated structured light[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(9): 1524-1534.
- [40] Zou X B, Zheng Q, Wu D, et al. Controllable cellular micromotors based on optical tweezers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(27): 2002081.
- [41] 刘梦蛟, 李添悦, 戈钦, 等. 多功能超构表面的相位调控机制及研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(21): 2126004.
Liu M J, Li T Y, Ge Q, et al. Phase modulation mechanism and research progress of multifunctional metasurfaces[J]. *Acta*

- Optica Sinica, 2022, 42(21): 2126004.
- [42] Zang W B, Yuan Q, Chen R, et al. Chromatic dispersion manipulation based on metalenses[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(27): 1904935.
- [43] Li T Y, Fu B Y, Ren J Z, et al. Multidimensional light field manipulation and applications based on optical metasurface[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11850: 1185004.
- [44] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13: 139-150.
- [45] Chen W T, Zhu A Y, Capasso F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5: 604-620.
- [46] Zou X J, Zheng G G, Yuan Q, et al. Imaging based on metalenses[J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 2.
- [47] 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.
- [48] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11: 426-431.
- [49] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [50] 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: 227-231.
- [51] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13: 227-232.
- [52] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [53] Hu Y Q, Li L, Wang Y J, et al. Trichromatic and tripolarization-channel holography with noninterleaved dielectric metasurface[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(2): 994-1002.
- [54] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10: 308-312.
- [55] 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.
- [56] Bao Y J, Lin Q L, Su R B, et al. On-demand spin-state manipulation of single-photon emission from quantum dot integrated with metasurface[J]. *Science Advances*, 2020, 6(31): eaba8761.
- [57] Shi Y Z, Song Q H, Toftul I, et al. Optical manipulation with metamaterial structures[J]. *Applied Physics Reviews*, 2022, 9(3): 031303.
- [58] Shen Z, Huang X Y. A review of optical tweezers with metasurfaces[J]. *Photonics*, 2023, 10(6): 623.
- [59] Fu B Y, Li T Y, Zou X J, et al. Steerable chromatic dispersive metalenses in dual bands[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2022, 55(25): 255105.
- [60] Ren J Z, Li T Y, Fu B Y, et al. Wavelength-dependent multifunctional metalens devices via genetic optimization[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(11): 3908-3916.
- [61] Li T Y, Li X Y, Yan S H, et al. Generation and conversion dynamics of dual Bessel beams with a photonic spin-dependent dielectric metasurface[J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(1): 014059.
- [62] Dorrah A H, Capasso F. Tunable structured light with flat optics[J]. *Science*, 2022, 376(6591): eabi6860.
- [63] Xu X H, Cheng C, Zhang Y, et al. Scattering and extinction torques: how plasmon resonances affect the orientation behavior of a nanorod in linearly polarized light[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2016, 7(2): 314-319.
- [64] Nieto-Vesperinas M, Xu X H. The complex Maxwell stress tensor theorem: the imaginary stress tensor and the reactive strength of orbital momentum. A novel scenery underlying electromagnetically optical forces[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 297.
- [65] Nieto-Vesperinas M, Xu X H. Reactive helicity and reactive power in nanoscale optics: evanescent waves. Kerker conditions. Optical theorems and reactive dichroism[J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(4): 043080.
- [66] Zhang Y, Li T Y, Wang S M, et al. Polarization-dependent optical forces arising from fano interference[J]. *Advanced Physics Research*, 2023, 2(5): 2200048.
- [67] Chaumet P C, Nieto-Vesperinas M. Time-averaged total force on a dipolar sphere in an electromagnetic field[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(15): 1065-1067.
- [68] Nieto-Vesperinas M, Sáenz J J, Gómez-Medina R, et al. Optical forces on small magnetodielectric particles[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11428-11443.
- [69] Fu S Y, Shang Z J, Hai L, et al. Orbital angular momentum comb generation from azimuthal binary phases[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2022, 1(1): 016003.
- [70] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuno F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 796-808.
- [71] Ni J C, Huang C, Zhou L M, et al. Multidimensional phase singularities in nanophotonics[J]. *Science*, 2021, 374(6566): eabj0039.
- [72] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [73] 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.
- [74] Biener G, Niv A, Kleiner V, et al. Geometrical phase image encryption obtained with space-variant subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1096-1098.
- [75] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [76] 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: 937-943.
- [77] Bao Y J, Ni J C, Qiu C W. A minimalist single-layer metasurface for arbitrary and full control of vector vortex beams[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(6): 1905659.
- [78] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, et al. Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(5): 2885-2892.
- [79] Bao Y J, Wen L, Chen Q, et al. Toward the capacity limit of 2D planar Jones matrix with a single-layer metasurface[J]. *Science Advances*, 2021, 7(25): eabh0365.
- [80] Bliokh K Y, Gorodetski Y, Kleiner V, et al. Coriolis effect in optics: unified geometric phase and spin-Hall effect[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(3): 030404.
- [81] Gorodetski Y, Biener G, Niv A, et al. Optical properties of polarization-dependent geometric phase elements with partially polarized light[J]. *Optics Communications*, 2006, 266(2): 365-375.
- [82] 李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, 44(3): 255-275.
- Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 255-275.
- [83] Colom R, Mikheeva E, Achouri K, et al. Crossing of the branch cut: the topological origin of a universal 2π -phase retardation in non-hermitian metasurfaces (laser photonics rev. 17(6)/2023) [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(6): 202300114

- 2370029.
- [84] Song Q H, Odeh M, Zúñiga-Pérez J, et al. Plasmonic topological metasurface by encircling an exceptional point[J]. *Science*, 2021, 373(6559): 1133-1137.
- [85] 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.
- [86] Chen C, Gao S L, Xiao X J, et al. Highly efficient metasurface quarter-wave plate with wave front engineering[J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(3): 2000154.
- [87] Liu M Z, Zhu W Q, Huo P C, et al. Multifunctional metasurfaces enabled by simultaneous and independent control of phase and amplitude for orthogonal polarization states[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 107.
- [88] Overvig A C, Malek S C, Carter M J, et al. Selection rules for quasibound states in the continuum[J]. *Physical Review B*, 2020, 102(3): 035434.
- [89] Overvig A C, Malek S C, Yu N F. Multifunctional nonlocal metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(1): 017402.
- [90] Huang H Q, Overvig A C, Xu Y, et al. Leaky-wave metasurfaces for integrated photonics[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18: 580-588.
- [91] Chen R, Li T Y, Bi Q H, et al. Quasi-bound states in the continuum-based switchable light-field manipulator[J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(3): 1232-1241.
- [92] Chen R, Bi Q H, Li T Y, et al. Dual-wavelength chiral metasurfaces based on quasi-bound states in the continuum[J]. *Journal of Optics*, 2023, 25(4): 045001.
- [93] Yang S, Hong C C, Jiang Y X, et al. Nanoparticle trapping in a quasi-BIC system[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(7): 1961-1971.
- [94] Shen Z, Xiang Z Y, Wang Z Y, et al. Optical spanner for nanoparticle rotation with focused optical vortex generated through a Pancharatnam-Berry phase metalens[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(16): 4820-4826.
- [95] Li B J, Xin Y J, Guo X Y, et al. Constructing spin-structured focal fields for chiral-sensitive trapping with dielectric metalens [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 1067825.
- [96] He M X, Guo Y H, Li C S, et al. Metasurface-based wide-angle beam steering for optical trapping[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 37275-37280.
- [97] Cai W Y, Yu H Y, Xu S P, et al. Optical focusing based on the planar metasurface reflector with application to trapping cold molecules[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2018, 35(12): 3049-3054.
- [98] Ma L, Guan J, Wang Y Q, et al. Diffraction-limited axial double foci and optical traps generated by optimization-free planar lens[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(4): 841-853.
- [99] Yin S Q, He F, Kubo W, et al. Coherently tunable metalens tweezers for optofluidic particle routing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38949-38959.
- [100] Zhang J, MacDonald K F, Zheludev N I. Optical gecko toe: Optically controlled attractive near-field forces between plasmonic metamaterials and dielectric or metal surfaces[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(20): 205123.
- [101] Chantakit T, Schlickriede C, Sain B, et al. All-dielectric silicon metalens for two-dimensional particle manipulation in optical tweezers[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1435-1440.
- [102] Mahdi Shanei M, Engay E, Käll M. Light-driven transport of microparticles with phase-gradient metasurfaces[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(24): 6428-6431.
- [103] Plidschun M, Ren H R, Kim J, et al. Ultrahigh numerical aperture meta-fibre for flexible optical trapping[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 57.
- [104] Kuo H Y, Vyas S, Chu C H, et al. Cubic-phase metasurface for three-dimensional optical manipulation[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(7): 1730.
- [105] Xiao J L, Plaskocinski T, Biabanifard M, et al. On-chip optical trapping with high NA metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(5): 1341-1348.
- [106] Markovich H, Shishkin I I, Hendler N, et al. Optical manipulation along an optical axis with a polarization sensitive meta-lens[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(8): 5024-5029.
- [107] Li T Y, Xu X H, Fu B Y, et al. Integrating the optical tweezers and spanner onto an individual single-layer metasurface[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 1062-1068.
- [108] Li X Y, Zhou Y, Ge S Y, et al. Experimental demonstration of optical trapping and manipulation with multifunctional metasurface[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 977-980.
- [109] 王颖颖, 何沛彤, 梁韬, 等. 用于悬浮光力系统的低噪声四象限探测器研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(11): 1104001.
- Wang Y Y, He P T, Liang T, et al. A low-noise quadrant photodetector for levitated optomechanical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(11): 1104001.
- [110] 田原, 郑瑜, 郭光灿, 等. 真空光镊技术与应用[J]. *物理实验*, 2021, 41(1): 1-8, 21.
- Tian Y, Zheng Y, Guo G C, et al. Technique and application of vacuum optical tweezers[J]. *Physics Experimentation*, 2021, 41(1): 1-8, 21.
- [111] 韩翔, 陈鑫麟, 熊威, 等. 真空光镊系统及其在精密测量中的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401011.
- Han X, Chen X L, Xiong W, et al. Vacuum optical tweezers system and its research progress in precision measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401011.
- [112] Jin Y B, Yan J W, Rahman S J, et al. 6 GHz hyperfast rotation of an optically levitated nanoparticle in vacuum[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1344-1350.
- [113] Wang J W, Yang X, Li Y K, et al. Optically spatial information selection with hybridly polarized beam in atomic vapor[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(5): 451-456.
- [114] Chen Y, Wang J W, Wang C Y, et al. Phase gradient protection of stored spatially multimode perfect optical vortex beams in a diffused rubidium vapor[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31582-31593.
- [115] Wang J W, Castellucci F, Franke-Arnold S. Vectorial light-matter interaction: exploring spatially structured complex light fields[J]. *AVS Quantum Science*, 2020, 2(3): 031702.
- [116] Qiu S W, Wang J W, Castellucci F, et al. Visualization of magnetic fields with cylindrical vector beams in a warm atomic vapor[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(12): 2325-2331.
- [117] Gonzalez-Ballester C, Aspelmeyer M, Novotny L, et al. Levitodynamics: Levitation and control of microscopic objects in vacuum[J]. *Science*, 2021, 374(6564): eabg3027.
- [118] Hu Y H, Kingsley-Smith J J, Nikkhou M, et al. Structured transverse orbital angular momentum probed by a levitated optomechanical sensor[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 2638.
- [119] Miao J, Bian G Q, Shan B, et al. Achieving ultracold Bose-Fermi mixture of ⁸⁷Rb and ⁴⁰K with dual dark magnetic-optical-trap[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(8): 080306.
- [120] 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.
- [121] Jin M K, Zhang X, Liu X, et al. A centimeter-scale dielectric metasurface for the generation of cold atoms[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(9): 4008-4013.
- [122] Hsu T W, Zhu W, Thiele T, et al. Single-atom trapping in a metasurface-lens optical tweezer[J]. *PRX Quantum*, 2022, 3(3): 030316.
- [123] Huang X Y, Yuan W J, Holman A, et al. Metasurface holographic optical traps for ultracold atoms[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2023, 89: 100470.
- [124] Shen K H, Duan Y, Ju P, et al. On-chip optical levitation with

- a metalens in vacuum[J]. *Optica*, 2021, 8(11): 1359-1362.
- [125] Chen J, Ng J, Lin Z F, et al. Optical pulling force[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 531-534.
- [126] Brzobohatý O, Karásek V, Šiler M, et al. Experimental demonstration of optical transport, sorting and self-arrangement using a ‘tractor beam’[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 123-127.
- [127] Dogariu A, Sukhov S, Sáenz J. Optically induced ‘negative forces’[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 24-27.
- [128] Novitsky A, Qiu C W, Wang H F. Single gradientless light beam drags particles as tractor beams[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(20): 203601.
- [129] Pfeiffer C, Grbic A. Generating stable tractor beams with dielectric metasurfaces[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(11): 115408.
- [130] Ivinskaya A, Kostina N, Proskurin A, et al. Optomechanical manipulation with hyperbolic metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4371-4377.
- [131] Jin R C, Xu Y H, Dong Z G, et al. Optical pulling forces enabled by hyperbolic metamaterials[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(24): 10431-10437.
- [132] Kostina N, Petrov M, Bobrovs V, et al. Optical pulling and pushing forces via Bloch surface waves[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4592-4595.
- [133] Chu Y J L, Jansson E M, Swartzlander G A. Measurements of radiation pressure owing to the grating momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(6): 063903.
- [134] Peng M, Luo H, Zhang Z J, et al. Optical pulling using chiral metalens as a photonic probe[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(12): 3376.
- [135] Zhang X J, Zangeneh-Nejad F, Chen Z G, et al. A second wave of topological phenomena in photonics and acoustics[J]. *Nature*, 2023, 618: 687-697.
- [136] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M. Topological photonics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 821-829.
- [137] Ozawa T, Price H M, Amo A, et al. Topological photonics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2019, 91(76): 015006.
- [138] Lin Z K, Wang Q, Liu Y, et al. Topological phenomena at defects in acoustic, photonic and solid-state lattices[J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5: 483-495.
- [139] Wang D L, Qiu C W, Rakich P T, et al. Guide-wave photonic pulling force using one-way photonic chiral edge states[C]//2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10–15, 2015, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [140] Li H, Cao Y Y, Shi B J, et al. Momentum-topology-induced optical pulling force[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(14): 143901.
- [141] Wang N, Zhang R Y, Guo Q H, et al. Optical pulling using topologically protected one way transport surface-arc waves[J]. *Physical Review B*, 2022, 105(1): 014104.
- [142] Qu T T, Wang N, Wang M D, et al. Flexible electromagnetic manipulation by topological one-way large-area waveguide states[J]. *Physical Review B*, 2022, 105(19): 195432.
- [143] 毕千惠, 彭于娟, 陈润, 等. 光子学连续域束缚态的理论及应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(16): 1623008.
Bi Q H, Peng Y J, Chen R, et al. Theory and application of bound states in the continuum in photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(16): 1623008.
- [144] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, et al. Bound states in the continuum[J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(9): 16048.
- [145] Zhen B, Hsu C W, Lu L, et al. Topological nature of optical bound states in the continuum[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(25): 257401.
- [146] Qin H Y, Shi Y Z, Su Z P, et al. Exploiting extraordinary topological optical forces at bound states in the continuum[J]. *Science Advances*, 2022, 8(49): eade7556.
- [147] Du L P, Yang A P, Zayats A V, et al. Deep-subwavelength features of photonic skyrmions in a confined electromagnetic field with orbital angular momentum[J]. *Nature Physics*, 2019, 15: 650-654.
- [148] Liu M, Zentgraf T, Liu Y M, et al. Light-driven nanoscale plasmonic motors[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5: 570-573.
- [149] Tanaka Y Y, Albella P, Rahmani M, et al. Plasmonic linear nanomotor using lateral optical forces[J]. *Science Advances*, 2020, 6(45): eabc3726.
- [150] Wu X F, Ehehalt R, Razinskas G, et al. Light-driven microdrones[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17: 477-484.
- [151] Magallanes H, Basselet E. Macroscopic direct observation of optical spin-dependent lateral forces and left-handed torques[J]. *Nature Photonics*, 2018, 12: 461-464.
- [152] Andrén D, Baranov D G, Jones S, et al. Microscopic metavehicles powered and steered by embedded optical metasurfaces[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16: 970-974.
- [153] Qin H Y, Redjem W, Kante B. Tunable and enhanced optical force with bound state in the continuum[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(7): 1774-1777.
- [154] Li T Y, Kingsley-Smith J J, Hu Y H, et al. Reversible lateral optical force on phase-gradient metasurfaces for full control of metavehicles[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(2): 255-258.
- [155] Ilic O, Atwater H A. Self-stabilizing photonic levitation and propulsion of nanostructured macroscopic objects[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 289-295.
- [156] Li X, Liu Y N, Lin Z F, et al. Non-Hermitian physics for optical manipulation uncovers inherent instability of large clusters [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 6597.
- [157] Ni F C, Liu H G, Zheng Y L, et al. Nonlinear harmonic wave manipulation in nonlinear scattering medium via scattering-matrix method[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(4): 046010.
- [158] 巩凡, 任煜轩. 激光双光镊在单分子生物物理中的研究进展 [J]. *中国激光*, 2023, 50(15): 1507402.
Gong F, Ren Y X. Advances in laser dual-trap optical tweezers in single-molecule biophysics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(15): 1507402.
- [159] 肖雨晴, 史阳, 李宝军, 等. 基于锥形光纤光镊的细胞操控与神经调控[J]. *中国激光*, 2023, 50(15): 1507302.
Xiao Y Q, Shi Y, Li B J, et al. Cell manipulation and neuron regulation based on tapered optical fiber tweezers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(15): 1507302.
- [160] Chen X, Gu M. Two-beam ultrafast laser scribing of graphene patterns with 90-nm subdiffraction feature size[J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 1.
- [161] Hu M Y, Xu S P, Yuan S, et al. Breakdown spectroscopy induced by nonlinear interactions of femtosecond laser filaments and multidimensional plasma gratings[J]. *Ultrafast Science*, 2023, 3: 13.
- [162] Huang P, Yuan H, Cao H B, et al. All-optical sampling of ultrashort laser pulses based on perturbed transient grating[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(20): 5369-5372.

Metasurfaces-Empowered Optical Micromanipulation (Invited)

Xu Xiaohao^{1,2}, Gao Wenyu^{1,2}, Li Tianyue^{3,4}, Shao Tianhua^{3,4}, Li Xingyi⁵, Zhou Yuan^{1,2},
Gao Geze^{3,4}, Wang Guoxi^{1,2}, Yan Shaohui^{1,2}, Wang Shuming^{3,4**}, Yao Baoli^{1,2*}

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

⁴Collaborative Innovation Center for Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

⁵College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract

Significance Optical micromanipulation utilizes optical force to dynamically control particles, which has the characteristics of non-contact and can be operated in a vacuum environment. Since the invention of optical tweezers in the 1980s, the field has experienced rapid development and has given rise to many emerging research directions, such as holographic optical tweezers, near-field evanescent wave optical tweezers, fiber optic tweezers, optoelectronic tweezers, and photo-induced temperature field optical tweezers, providing rich and powerful tools for fields such as biology, chemistry, nanoscience, and quantum technology. These methods can not only capture, separate, and transport small objects but also allow more precise manipulation, such as the rotation of small objects. However, traditional manipulation methods rely on tightly focused local light, greatly limiting the action range of optical force. In addition, in order to generate a structured light field, larger optical components such as spatial light modulators are usually required, making it difficult to miniaturize and integrate the optical manipulation system.

In recent years, metasurfaces have emerged as integrated devices composed of subwavelength nanoantennas, promising new opportunities for optical micromanipulation. This ultra-thin artificial microstructure device can flexibly control multiple degrees of freedom such as amplitude, phase, and polarization of light, by specially designing the geometric shape, size, and material of its own micro/nanostructure. Compared with traditional optical components such as liquid crystal spatial light modulators, gratings, and lenses, metasurfaces exhibit higher operating bandwidth, structural compactness, and integration. With the merits of miniaturization, integration, and excellent performance in light tailoring, optical metasurfaces have been extensively incorporated into the realm of optical micromanipulation. Especially, owing to their peculiar photomechanical properties, the metasurfaces hold the ability to be actuated by light fields, paving the way to the next generation of light-driven artificial micro-robots. The fast development of this subject indicates that the time is now ripe to overview recent progress in this cross-field.

Progress We summarized principles of optical micromanipulation and metasurfaces (Fig. 1) and overviewed meta-manipulation devices, including metasurface-based optical tweezers (Fig. 2), tractor beams (Fig. 5), multifunctional micro-manipulation systems (Fig. 3), and metamachines (Figs. 7 and 8). Furthermore, we provided a detailed discussion of novel mechanical effects, such as topological light manipulation, which stems from the topological characteristics of nanostructures (Fig. 6).

Conclusions and Prospects We review the cutting-edge developments in the field of optical micromanipulation based on metasurfaces. The metasurface-based micromanipulation technology is expected to evolve toward higher temporal resolution, higher spatial accuracy, and lower manipulation power. To this end, more urgent requirements have been imposed on the underlying design scheme and experimental preparation standards of the metasurface. Although the introduction of metasurfaces has benefited micromanipulation systems and significantly reduced their sizes, there is still much room for further development and improvement in wide bands, multi-dimensional responses, and device thresholds.

In terms of micromanipulation systems, the subwavelength-scale structure of metasurfaces will continue to be a key focus of research. Especially in the field of topological light manipulation, it is expected to further expand its research scope, combining non-Abelian, non-Hermitian, and nonlinear effects to discover new physical phenomena. In the fields of biology and chemistry, metasurface technology is expected to be flexibly applied on smaller scales, even achieving manipulation of single molecule-level objects. This technology is expected to be further applied to the fields such as battery

quality inspection and targeted therapy, bringing changes to the basic research and practical applications of energy and life sciences. Specifically, in the development of ultrafast optics, metasurfaces are gradually exhibiting unique advantages. Nanoscale superlattice enables high-resolution spectral measurements, and the design of nonlinear superlattice surfaces can be used to enhance nonlinear effects or generate high-order harmonics, making high time resolution transient micromanipulation technology possible.

Overall, the technological evolution from traditional optical micromanipulation to meta-manipulation will continue to drive the vigorous development of nanophotonics. This technological paradigm not only meets the needs of various basic research but also arouses more innovative applications, opening up new prospects for branched sciences and technologies.

Key words metasurface; optical micromanipulation; optical tweezers; photomechanics