

光学学报

光力矩的基本原理及其应用

陶也¹, 钟伟¹, 吴欣怡¹, 何涛^{1,2,3,4}, 赖成兴¹, 王占山^{1,2,3,4}, 施宇智^{1,2,3,4*}, 程鑫彬^{1,2,3,4**}

¹同济大学物理科学与工程学院, 同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092;

²先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;

³上海市数字光学前沿科学研究基地, 上海 200092;

⁴上海市全光谱高性能光学薄膜器件与应用专业技术服务平台, 上海 200092

摘要 光镊技术通过在细小物体上施加光力对物体进行操控, 而伴随光力产生的光力矩同样广泛存在于光学操控中。光力矩与光力一样, 具有无接触、操控尺寸小、精度高等特点, 在生物医学、物理学和量子科学等领域被广泛应用。光力矩根据其施加光场偏振旋向的关系可分为正光力矩和负光力矩。从正负光力矩产生的原理和条件、光力矩的增强、光力矩的物理和生物应用出发, 对光力矩光镊操控进行回顾和讨论, 最后对光力矩光镊操控面临的挑战进行了总结, 对其未来的发展方向如微型扭矩测量、光驱动生物机器人等进行了展望。

关键词 光力矩; 光镊; 光流控; 多功能操控; 生物颗粒

中图分类号 O439; TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231146

1 引言

光镊的基本原理在于光与物质微粒之间动量传递的力学效应。光镊利用光力和光力矩对颗粒进行操控, 自 Ashkin^[1-10] 的开创性工作以来, 其在 30 多年间取得了巨大的进展^[11-16]。目前, 光镊被广泛用于物理和生物化学等领域的研究^[13-14, 17-29], 包含生物聚合物的基本机械特性和驱动细胞内部动力学的众多分子机器等应用^[30-34]。光具有线性动量和角动量。在光与物质的相互作用过程中, 线性动量和角动量的传递可以产生光力, 角动量的传递还可以产生光力矩^[35]。光力矩是指光束对物体施加的旋转力矩, 它是由光束的角动量和光与物体之间的相互作用引起的。

光力矩的研究最早可以追溯到 1996 年, 澳大利亚昆士兰大学的研究团队 Friese 等^[36] 测量出粒子旋转时所吸收的光子的自旋角动量 (SAM)。将使颗粒旋转方向与光的圆(椭)偏振旋转方向相同的力矩定义为正光力矩, 将使颗粒旋转方向与光的圆(椭)偏振旋转方向相反的力矩定义为负光力矩。光力矩随着材料中吸收的引入而增加, 并且随着多极子的出现得到进一步增强^[37]。

正光力矩可以由三种方式产生, 分别利用光子的 SAM、轨道角动量 (OAM) 和 SAM 与 OAM 的相互作

用。利用 SAM, 具有吸收机制的瑞利 (Rayleigh) 纳米球可以在一个高聚焦的高斯光束中被捕获, 并且在 SAM 的作用下自转^[38]。利用圆(椭)偏振光 SAM 的转移, 金属纳米线可以在一定角频率的光束作用下自旋^[39-40]。这一特点衍生出了许多物理和生物领域的应用, 如微流搅拌^[39]、力矩测量^[41]、量子测量^[42] 等。

通常情况下, 光力矩都比较小, 这限制了其实际应用。可以通过多种方法增强光力矩, 从而增加其应用价值。传统的光力矩增强方式有谐振环^[43]、等离激元^[44] 和干涉法^[45]。但上述方法一般设计复杂, 而且只能将光力矩增强一个数量级。2013 年, 来自捷克的科学家 Brzobohatý 等^[46] 利用复合多极子增强光的散射从而增强光力。同样, 在 2022 年, 来自上海交通大学的 Shi 等^[47] 研究发现, 利用超复合模式及电环形多极子可以增强光力, 且可以将光力矩增强两个数量级, 实现了进一步的突破, 给光驱动机器人等应用带来了新思路。

本文回顾光镊技术中光力矩的研究进展, 文章结构如图 1 所示。首先, 分别介绍正光力矩和负光力矩产生的几种方式, 分析了各种方式的优劣; 然后, 介绍了光力矩的增强机制和最新进展, 特别地, 将介绍光力矩在物理和生物领域的应用; 最后, 对光力矩光镊技术进行了总结和展望。

收稿日期: 2023-06-15; **修回日期:** 2023-07-09; **录用日期:** 2023-07-17; **网络首发日期:** 2023-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (61925504, 62192770, 61621001, 62205246, 62020106009, 6201101335, 62205249, 62192772, 62111530053)、上海市科学技术委员会科技计划项目 (17JC1400800, 20JC1414600, 21JC1406100, 22ZR1432400)、上海市教育委员会“曙光”计划项目 (17SG22)、上海市级科技重大专项 (2021SHZDZX0100)、中央高校基本科研业务费专项资金、中国博士后科学基金 (2022M712401)

通信作者: *yzshi@tongji.edu.cn; **chengxb@tongji.edu.cn

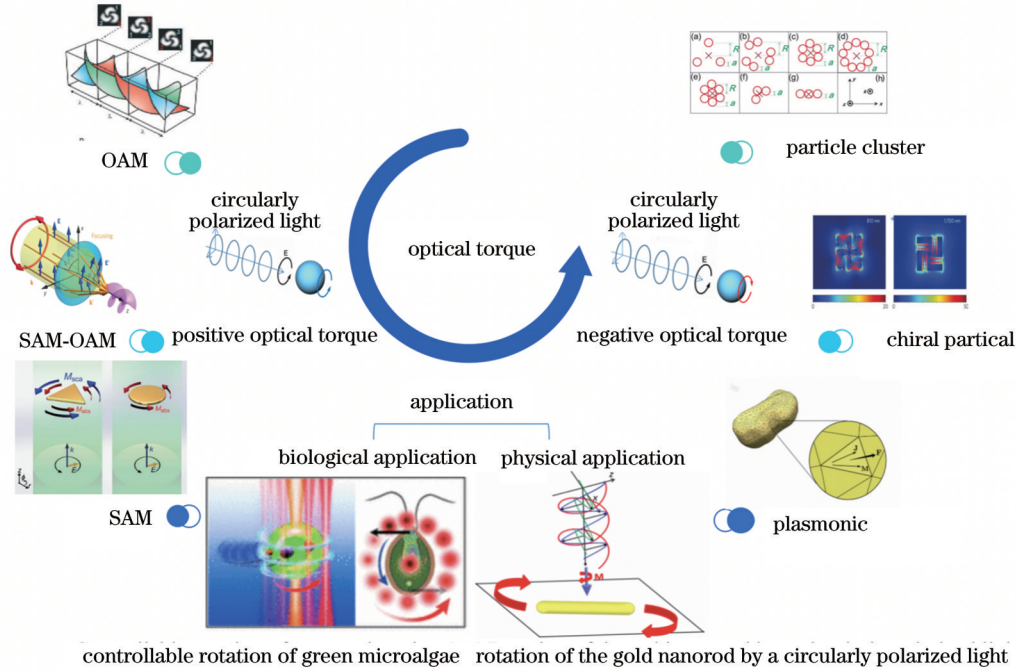


图 1 文章结构
Fig. 1 Structure of this paper

2 正光力矩

光镊技术经过 30 多年的长足发展,其各种各样的多功能构型应运而生,光力矩光镊便是其中一种。

光同时具有 SAM 和 OAM,当光子受到颗粒散射、折射或吸收后,会将动量传递给颗粒,对粒子产生一个光力或者一个使粒子旋转的光力矩,这些动力学性质是由光的偏振和光的传播(即波矢量、波速)决定的^[48]。当粒子的旋转方向与光的偏振旋转方向一致时,即为正光力矩。在偶极子近似条件下,粒子上的光力矩^[49-50]可以被推导出来。

一束沿 $-z$ 方向传播的平面波经过四分之一波片后,其电场可以表示为

$$E = A(\cos \gamma \hat{x} + i \sin \gamma \hat{y}) \exp(-ikz), \quad (1)$$

式中: A 为振幅; γ 为光束电场和四分之一波片快轴(即 x 轴)之间的夹角; \hat{x} 和 \hat{y} 为单位向量; $k = n\omega/c$ 为介质中的波数,其中 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ 是介质的折射率(ϵ 和 μ 为介质的介电常数和磁导系数), ω 为角频率, c 为光速。平面波沿 z 轴负方向传播。当 γ 为 0° 、 22.5° 、 45.0° 、 135.0° 或者 180.0° 时,光分别是线偏振、椭圆偏振、左手圆偏振、右手圆偏振和线偏振。

光场的一个主要的局部动力学特性是时间平均的 SAM,可以用电场和磁场来表示:

$$s = s_e + s_m = \frac{g}{2} \text{Im} \left(\frac{1}{\mu} E^* \times E + \frac{1}{\epsilon} H^* \times H \right), \quad (2)$$

式中: s_e 为电场的贡献; s_m 为磁场的贡献; $g = (8\pi\omega)^{-1}$ 为高斯单位; $\text{Im}(\cdot)$ 表示虚数部分; H 与 H^* 分别为磁场

强度和磁场强度的共轭。偶极子上的光力矩可以表示为

$$M = \frac{1}{2} \text{Re}(d_e^* \times E + d_m^* \times H), \quad (3)$$

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 表示实数部分; d_e 和 d_m 分别为复电偶极矩和复磁偶极矩,可以描述为

$$\begin{cases} d_e = \alpha_e E \\ d_m = \alpha_m H \end{cases}, \quad (4)$$

式中: α_e 和 α_m 为复电极化率和复磁极化率。将式(4)代入式(3),与式(2)比较,得到:

$$M = g^{-1} [\mu \text{Im}(\alpha_e) s_e + \epsilon \text{Im}(\alpha_m) s_m]. \quad (5)$$

复电极化率 α_e 满足:

$$\alpha_e = \alpha_{e,0} \left(1 - i \frac{2}{3\epsilon} k^3 \alpha_{e,0} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$\alpha_{e,0} = \epsilon a^3 \frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_p + 2\epsilon} = \epsilon a^3 C_e, \quad (7)$$

式中: a 为粒子的半径; ϵ_p 为粒子的介电常数; $C_e = \frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_p + 2\epsilon}$ 。将式(7)代入式(6)可以得到:

$$\alpha_e = \frac{9\epsilon a^3 C_e + i6\epsilon k^3 a^6 C_e^2}{9 + 4k^6 a^6 C_e^2}. \quad (8)$$

相似地,磁极化率可以被表示为

$$\alpha_m = \alpha_{m,0} \left(1 - i \frac{2}{3\mu} k^3 \alpha_{m,0} \right)^{-1}, \quad (9)$$

$$\alpha_{m,0} = \mu a^3 \frac{\mu_p - \mu}{\mu_p + 2\mu} = \mu a^3 C_m, \quad (10)$$

式中: μ_p 为粒子的磁导系数; $C_m = (\mu_p - \mu)/(\mu_p + 2\mu)$ 。

因此,

$$\alpha_m = \frac{9\mu a^3 C_m + 4ik^3 a^3 C_m}{9 + 4k^6 a^6 C_m^2} \quad (11)$$

对于非吸收非磁性偶极子粒子, $\text{Im}(\alpha_m) = 0$, 因此, 只需要考虑电偶极子。对于一个在非吸收介质中的非吸收材料粒子, C_e 在式(8)里是存在的。并且, 光力矩的方向和 SAM 的方向一致。对于一个吸收材料的粒子, $\text{Im}(\alpha_e) > 0$ 。通过把式(1)和式(2)代入式(5), 经过四分之一波片的光产生的力矩可以表示为

$$M_e = A^2 \text{Im}(\alpha_e) \sin \gamma \cos \gamma \hat{z} \quad (12)$$

当 $0 < \gamma < 90^\circ$ 时, 光力矩为 $+z$ 方向, 且为正值; 当 $\gamma = 45^\circ$ 时, 光力矩达到最大值(左旋圆偏振, LCP)。当一个 $-\pi/2$ 相位 ($-i$) 应用于 y 轴时, 光力矩的符号反转。

2.1 光 SAM 产生光力矩

研究发现, 利用光子的 SAM, 可以实现球形粒子绕着自身中心轴的旋转以及金属纳米线可控制角度和速度的绕着自身中点的旋转。通常认为, 吸收是纳米尺度上粒子的正扭矩产生的主要机制, SAM 和 OAM 都可以转移到吸收粒子上^[51]。根据 $M_{\text{tot}} = M_{\text{abs}} + M_{\text{sca}}$, 即

作用在粒子上的光力矩 M_{tot} 等于散射力矩 M_{sca} 与吸收力矩 M_{abs} 之和, 颗粒所受总力矩可以通过对力和力臂的积分得到, 表示为 $M_{\text{tot}} = \oint_S (\mathbf{r} \times \vec{T}) \cdot \hat{n} dS$, 式中: \vec{T} 为 Minkowski 形式的 Maxwell 应力张量; \hat{n} 为垂直于积分面朝外的单位矢量^[52]; S 为积分包络面; \mathbf{r} 为力臂。吸收力矩可以用式(12)表示, 散射力矩为总力矩减去吸收力矩。

如图 2 所示, 图 2(a)、(b) 分别为吸收和散射主导的两种不同的光力矩产生机制。图 2 中一个圆偏振平面波(用波矢量 k 和电场 E 表示) 在等离激元共振中入射到两个金纳米粒子上。图 2(b) 表示在圆形粒子上, 光波的散射不能产生光力矩, 光力矩全部由吸收产生。由于粒子吸收力矩与光子的 SAM 大小成正比, 且为正数, 而粒子的散射力矩可正可负, 因此, 当散射力矩为正或者散射力矩为负但其绝对值小于吸收力矩的绝对值时, 产生正光力矩; 而当散射力矩为负且其绝对值大于吸收力矩的绝对值时, 产生负光力矩, 如图 2(c) 所示。

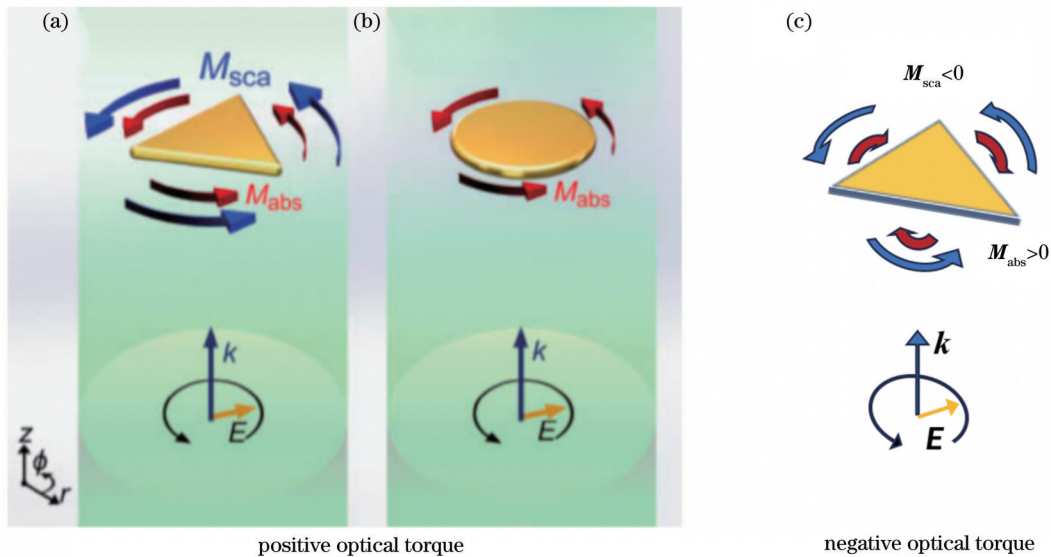


图 2 圆偏振光中的吸收力矩和散射力矩示意图。(a)(b) 吸收和散射主导的两种不同的光力矩产生机制^[37]; (c) 负光力矩产生机制
Fig. 2 Schematic of absorbing and scattering optical torques in circularly polarized light. (a)(b) Two different generation mechanisms of optical torque mediated by absorption and scattering, respectively^[37]; (c) generation mechanism of negative optical torque

自从 1996 年澳大利亚昆士兰大学 Friese 等^[36] 测量出粒子旋转时所吸收的光子的 SAM 大小以来, SAM 产生的光力矩已经被广泛应用于各个领域。人们发现使用单一的椭圆或圆偏振高聚焦高斯光束可以捕获和操纵高吸收粒子, 并且可以精确控制粒子的旋转角度^[38]。2004 年, 来自美国的 Bishop 等^[53] 设计了一个光学系统, 精确测量了由光束施加在双折射探针粒子上的正光力矩, 并将其应用于生物领域中细胞内部结构粘度的测量。

有趣的是, 虽然吸收被认为是正光力矩产生的主要机制[图 2(a)], 2014 年, 来自美国麻省理工学院的

Lee 等^[37] 却利用多极等离激元共振增强了散射的贡献。结果表明, 共振散射引起的光力矩可占金粒子总光力矩的 80%。这种以散射为主导的光力矩伴随着特殊的光学模式, 需要与以吸收为主导的机制区分开来。这一发现可以被应用于纳米尺度的光学操作以及等离激元和超构材料的新设计。

光子的 SAM 不仅可以使球形粒子旋转, 也可以使金属纳米线绕自身中点旋转^[49], 此技术被广泛应用于微流搅拌^[39]。

2.2 光 OAM 产生光力矩

30 年前的研究^[54] 发现, 一些光学模式(如激光模

式 TEM_{plq} 和 TEM_{nmq} 等) 的光也携带 OAM, 这在光镊领域创造了一场革命, 因为这种形式的角动量可以直接传递到各向同性和各向异性的物体^[55-57]。光的 OAM 大小受相位梯度的控制而不受光的偏振变化影响, 因此非常易于被实验控制。

角动量密度与横向电磁场的关系可以表示为

$$\mathbf{M} = \epsilon_0 \mathbf{r} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{B}), \quad (13)$$

式中: ϵ_0 为绝对介电常数; \mathbf{B} 为磁感应强度。而场的总角动量为

$$\mathbf{J} = \epsilon_0 \int \mathbf{r} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) d\mathbf{r}. \quad (14)$$

在原子物理学中, 认为

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}, \quad (15)$$

式中: \mathbf{L} 为 OAM; \mathbf{S} 为 SAM。通过计算, 认为当 $\mathbf{J} \neq \mathbf{S}$ 时, 这种模式的光子携带 OAM, 如激光模式 TEM_{plq} 和 TEM_{nmq} 等。

利用光的 OAM 可以实现粒子的捕获, 将粒子困在光的螺旋臂(光子的 OAM 辐射的范围)中, 使粒子绕着光轴旋转。2001 年, 来自英国的 Paterson 等^[58] 在光的干涉的模式中演示了光子将 OAM 传递给物体, 捕获物体并使之在光的螺旋臂中受控旋转的现象, 且改变光的模式, 可以改变物体的旋转方式。图 3 为方位指数 (azimuthal index) 等于 3 (即三重螺旋) 的高斯光束 (螺旋结构) 受平面波干扰时的相前和强度图, 它描述了一个三重缠绕的螺旋光波, 在受到平面波的干扰时, 每传播一个波长 λ 重复其形状, 但只有在 3λ 之后完全旋转。然而, 要用这种光束将 OAM 传递给被捕获的粒子, 粒子必须吸收部分光, 但是粒子吸收会导致散射力增大, 脱离光的捕获。因此, 粒子必须足够透明, 使吸收不太大, 才能保证梯度力, 将颗粒捕获在光束中。这反过来又限制了应用这种方法的粒子的范围, 并且它还进一步限制了这种技术, 因为这种吸收产生的任何加热都可能损坏旋转的粒子。此外, 由于粒子吸收难以量化, 因此很难实现光束中捕获物体的可控旋转。

光子具有 OAM 这一性质同样可以被用于金属纳米线的旋转。2013 年 Yan 等^[59] 的研究表明, 利用银纳

米线与线性偏振光的等离激元相互作用, 光子在高斯光束中的 OAM 可以诱导长度超过 10 μm 的单个银纳米线旋转。

2012 年, Shen 等^[60] 发现, 表面等离激元产生的等离激元涡旋 (PV) 也携带 OAM。2015 年, Zhang 等^[61] 发现, 与传统光学涡旋 (OV) 相比, PV 的 OAM 可以产生一个方位散射力, 使被捕获的粒子以更精确的半径和方向旋转。他们的研究表明, PV 镊子在操纵金属颗粒方面具有优势。

2.3 光轨道-自旋角动量 (SAM-OAM) 耦合产生光力矩

利用光的 SAM-OAM 耦合, 也可以实现对粒子的捕获和操控^[58]。如图 4 所示, 图 4(a)、(b) 分别为紧聚焦 (tight focusing)、颗粒散射这两种 SAM-OAM 耦合的情况。光同时具有 SAM 和 OAM, 这些动力学性质是由光的偏振和光的传播决定的。纳米光学、光子学和等离激元学倾向于探索亚波长尺度和结构光学场 (即空间不均匀) 的额外自由度。在这样的场中, SAM 和 OAM 可以变得相互强烈耦合^[48], 进而有可能产生光力矩。

其中紧聚焦情况下的 SAM-OAM 耦合在光镊中有较多的应用。2007 年, Zhao 等^[62] 证明了在紧聚焦光束中, 光学 SAM 到 OAM 的转换可以发生在均匀和各向同性的介质中, 并且被捕获粒子的轨道旋转速度会因为这种转换而改变。

在非倏逝场中, 光子携带的动量和 SAM 分别由波矢量和偏振决定。2014 年, 来自日本的 Bliokh 等^[49] 证明了对于倏逝波 (evanescent wave) 来说, 上述情况正好相反。一个倏逝波具有一个自旋分量, 它与偏振无关, 并与波矢量有关。此外, 这样的波带有动量分量, 它由圆偏振决定, 并与波矢量正交。这些非凡的性质揭示了一个基本的贝林凡特自旋动量 (Belinfante's spin momentum), 即在场论中已知, 但在传播场中不可观测。他们利用 SAM-OAM 耦合推动并转动了一个在倏逝场中的 Mie 粒子。在倏逝场中, 如图 4(c) 所示, 当波沿 z 轴传播时, 电场在横向 (x, y) 平面上旋转。这种旋转产生的 SAM, 在横向平面中由多个 SAM p° 环表示。同时, 波的传播产生 OAM p° 。OAM 和 SAM 局部耦合传递给探针粒子, 从而对其施加力和力矩^[49]。

3 负光力矩

当粒子的旋转方向与光的圆(椭)偏振旋转方向不一致时, 即为负光力矩。2010 年美国加州大学的研究人员 Liu 等^[44] 发现和利用了负光力矩。2014 年, Chen 等^[63] 正式提出负光力矩这一说法。随后负光力矩在近 10 年中得到了发展。然而, 有别于正光力矩, 负光力矩的产生通常需要利用一些特殊的粒子 (如手性粒子)、光场、粒子簇、等离激元、光的线性动量转化等。

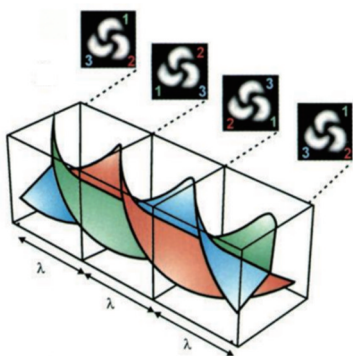


图 3 OAM 产生光力矩的示意图^[58]
Fig. 3 Schematic of optical torque from OAM^[58]

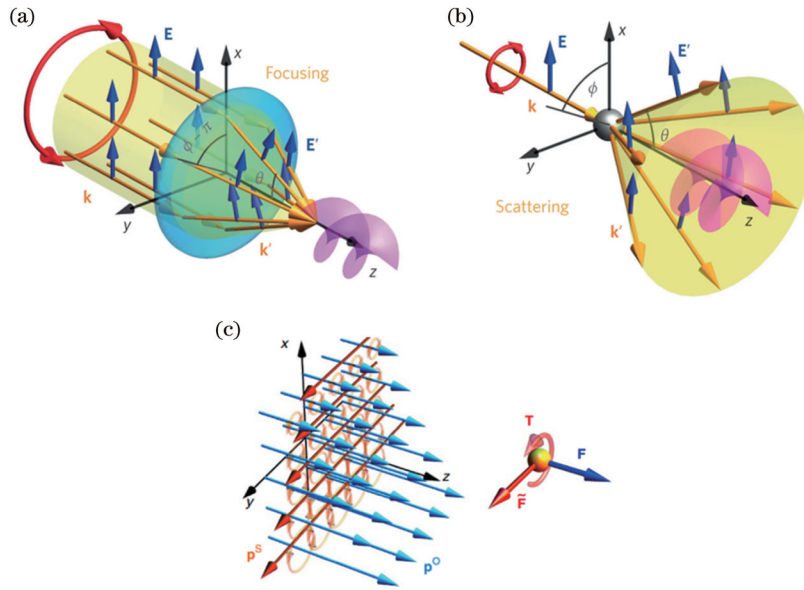


图 4 SAM-OAM 产生光力矩^[48]。(a)光的紧聚焦产生锥形的波矢量分布,从而产生 SAM-OAM 耦合;(b)粒子散射产生的 SAM-OAM 耦合;(c)在倏逝场中,光的传播产生的 SAM-OAM 耦合

Fig. 4 Optical torque from the SAM-OAM^[48]. (a) SAM-OAM interaction generated by conical wavevector distribution through tight focusing of a paraxial wave; (b) SAM-OAM interaction generated by particle scattering; (c) SAM-OAM interaction generated by wave propagation in evanescent field

负光力矩的发展,为光镊操控提出了新的思路。

3.1 作用于粒子簇或者粒子对上的负光力矩

利用粒子簇是实现负光力矩最早的方法之一。2014年,来自香港科技大学的Chen等^[63]利用电介质球不同的平面排列结构(图5),第一次实现了负光力矩。他们证明,对称的粒子簇(大于等于三个粒子)结构对于负光力矩的实现是具有重大意义的,并且负光力矩是广泛存在于各大结构(具有旋转对称性的单层结构^[63]、双层结构^[63]、粒子对^[64-65]等)的。此后近10年来,作用于粒子簇或粒子对上而产生的负光力矩的研究得到了进一步的发展^[66-68]。在2022年的最新研究中,Nan等^[67]利用可调谐的光,将定制的相位梯度压印到圆偏振平顶(即无强度梯度)激光束中,以捕获金属NPs并将其组装成可重构的集群,在同一粒子簇内实现了方向和大小可调的光力矩,并且实现了负力矩向正力矩和正力矩向负力矩的双重转化。在粒子数更多的二维多粒子系统中,Han等^[68]证明了多达101个等离子金属粒子在光学场中的正负力矩的产生。这对于用金属粒子构建大规模光学物质来说非常重要。

然而,在2022年之前的实验中,稳定的负光力矩仅存在于具有3个或更多个数的球形颗粒簇结构中。2022年,Qi等^[64]首次实现了粒子对(即两个粒子)上的负光力矩。研究表明,通过增加粒子直径,可以在光学粒子二聚体上产生负光力矩。这一发现将稳定的光学负力矩的观测极限推到了尺寸更小的光学物质,证明了在这样的系统中负光力矩是可以普遍存在的,为制造光驱动纳米马达提供了新的思路。

3.2 作用于手性粒子上的负光力矩

光-手性物质的相互作用近年来受到关注,由于这种相互作用,新的光力类型在光学对手性的分离中具有潜在的应用^[69-73]。最近有报道称,手性物体固有的混合电磁极化率可以促进反冲效应^[74]。在圆偏振驻波中,将光的角动量转化为手性粒子的线性动量,甚至可以在特定手性结构上产生负光力矩^[75],如图6所示。

2010年,美国加州大学的Liu等^[44]发现,利用等离子手性粒子,可以将光子上的SAM传递给粒子并在粒子上产生负力矩,此外,他们发现可以通过改变入射光的波长来控制粒子旋转的速度和方向,从而激发不同的手性等离子模式。自此之后,利用手性粒子实现负光力矩得到了进一步的发展。

那么是否可以利用光子的线动量-角动量耦合实现手性粒子上的负力矩呢?答案是肯定的。2015年,来自法国的Canaguier-Durand等^[76]分析了如何通过光场和手性物体之间的线动量-角动量交叉耦合来产生拉方向的光力(pulling optical force)和负力矩。

2017年,我国的Chen等^[77]发现,可以利用粒子的手性特性,在光子上产生沿光束传播方向的OAM,从而使粒子受到反冲的纵向光力矩,即与光偏振旋转方向相反的负力矩,而SAM的传递不受影响,仍为正力矩。

3.3 通过线偏振光的SAM转化产生负光力矩

不同于以上的利用椭圆偏振光或者圆偏振光的光力矩产生方式,由线偏振光也可以产生负光力矩,这种方式通常称为光力矩扳手(OTW)^[79-82]。在OTW中,

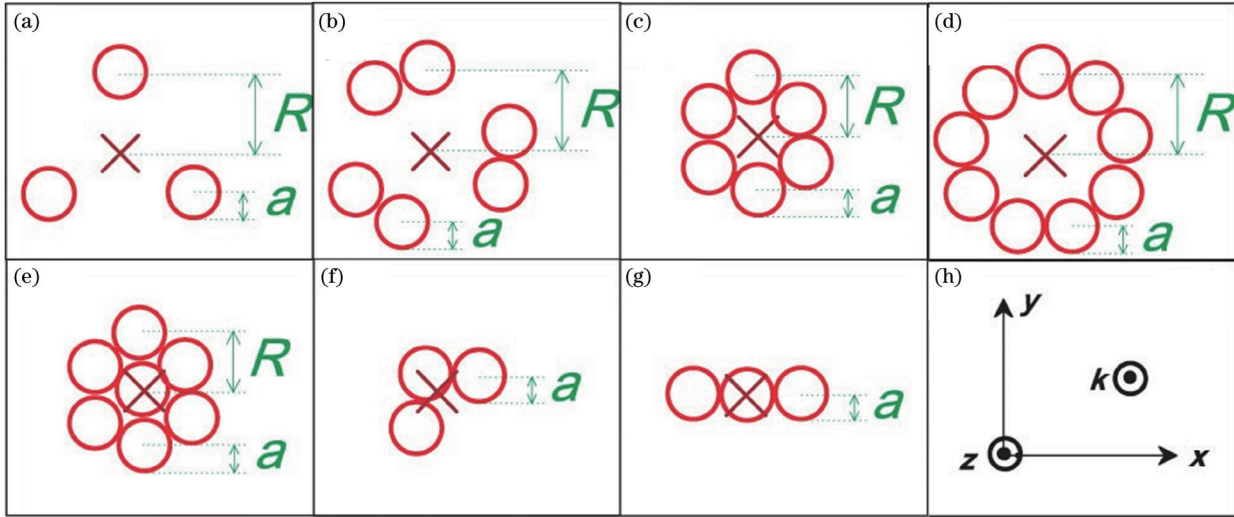


图 5 可实现负光力矩的平面结构实例^[63]。(a)~(g)由一组相同的介电球组成的不同结构;(h)入射波沿 z 轴的波矢量 k 。
 Fig. 5 Examples of planar structures that can realize negative optical torque^[63]. (a)~(g) Different structures composed of an array of identical dielectric spheres^[63]; (h) the incident plane wave has a k -vector (k) along the z -axis

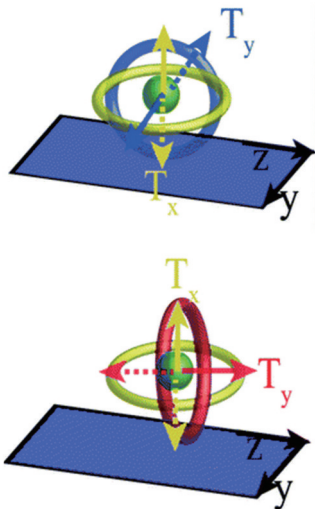


图 6 由光力(箭头)和光力矩(环)引起的手性粒子运动^[78]
 Fig. 6 Particle kinetics by the optical force (arrow) and optical torque (ring)^[78]

通过线偏振激光场中的 SAM 转化, 以将光力矩施加到双折射粒子上^[79-80, 83] [图 7(a), 其中: 光阱用红色虚线包围; 力矩参考系统用灰色圆点包围; 电光调制器 (EOM) 控制的偏振状态用黑色虚线方框内的红色箭头表示]。通过与双折射材料 [图 7(b)] 的相互作用, 在介质中产生的偏振 \vec{p} 通常不平行于激光偏振 \vec{E} [图 7(c)]。因此, $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$ 是非零的, 并且对粒子施加了有限扭矩 $\vec{\tau}$ 。这种方式在 2004 年被首次提出^[79], 在 2016 年被发现可以产生光的负力矩^[84]。

这种方式拓展了标准光镊的力矩操作和测量能力, 被广泛应用于力矩的直接测量和力矩的施加^[80-81]。其中, OTW 在单个脱氧核糖核酸 (DNA) 等生物分子的静态扭转特性测量中有着杰出的应用并具有使生物

细胞快速旋转的能力^[81]。2016 年, 美国 Mitri 等^[84] 的研究结果表明, 非绕射非傍轴分数贝塞尔涡旋光束 (Bessel beam)^[85] 能够诱导任意放置在其路径上的吸收瑞利球发生自旋反转, 即负光力矩。

3.4 作用于等离激元上的光力矩

等离激元 (surface plasmon) 近来常被作为施加光力矩的优良物质之一, 在近 10 年来受到了广泛关注^[37, 86-88]。利用等离激元的特殊特性产生负光力矩的方式有很多, 此外, 利用等离激元还可以实现力矩的增强^[37, 45, 89]。

2010 年, 来自中国的 Liu 等^[44] 展示了一种 nm 级等离激元结构, 如图 8(a) 所示, 该结构可以产生负光力矩。当线性偏振光照射时, 中间的 nm 尺寸金马达可以产生光力矩, 能够带动旋转体积比自身大 4000 倍的硅微盘, 如图 8(b) 所示。此外, 通过改变入射光的波长, 可以控制旋转的速度和方向, 从而激发不同的等离激元模式, 如图 8(c) 所示, 图 8(c) 为归一化电场分布, 红色箭头表示坡印亭磁通量, 它与马达附近光的线性动量成正比。坡印亭磁通量被分散/吸收在马达的外侧, 在马达上产生力矩, 使其逆时针旋转, 其旋转方向与入射场角动量方向相反, 即产生了负光力矩。改变光的波长, 如图 8(c) 所示, 在照明波长为 1700 nm 处, 坡印亭磁通量通过间隙, 被马达弯头散射/吸收, 为马达提供顺时针的光力矩。最近, 德国维尔茨堡大学的 Wu 等^[90] 通过设计可移动超结构中的金纳米天线, 顺利实现了光力矩的精确调控, 进而实现了光驱动“微米无人机”, 为光力矩的研究和应用提供了新的思路。

2022 年, 来自复旦大学的 Chen 等^[87] 从理论上和数值上证明了在由两个线偏振平面波组成的干涉光场中, 类法诺共振 (fano-like resonance, 一种会产生非对称线形的散射共振现象) 可以在偶极等离激元核壳纳

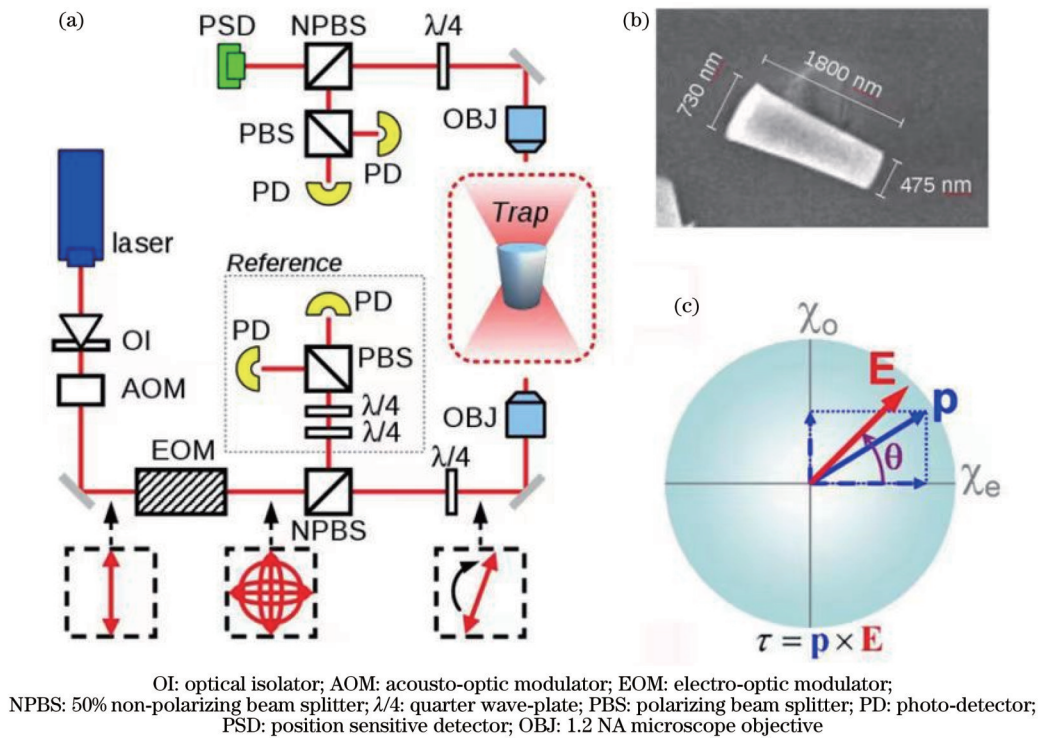


图 7 利用线性动量转化在双折射粒子上产生负光力矩^[80]。(a) 光学装置示意图;(b)用于 OTW 的纳米制双折射石英圆柱体的扫描电子显微镜(SEM)图像;(c) 双折射晶体内部产生力矩的示意图
 Fig. 7 Negative optical torque on a birefringent particle by the transferring of the linear momenta^[80]. (a) Diagram of the optical setup; (b) SEM image of a nano-fabricated birefringent quartz cylinder with OTW; (c) schematic depicting of the torque generation inside a birefringent crystal

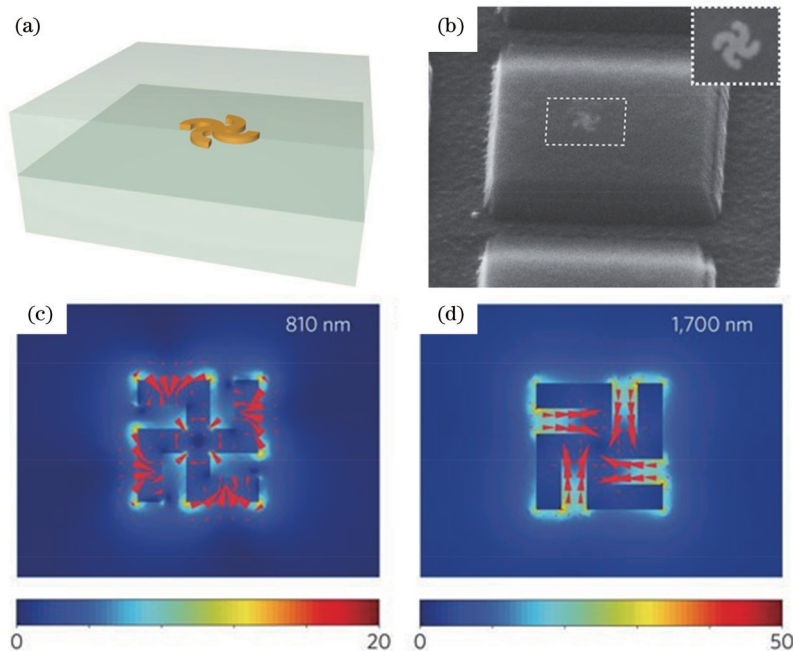


图 8 作用于等离子手性颗粒的负光力矩^[44]。(a)nm 尺寸的金马达示意图;(b)包含等离子马达的硅盘的 SEM 图像;(c)当照明波长 $\lambda=810$ nm 时感应到的马达上的电场和坡印亭矢量;(d)当照明波长 $\lambda=1700$ nm 时感应到的马达上的电场和坡印亭矢量
 Fig. 8 Negative optical torque on plasmonic chiral particles^[44]. (a) Illustration of the nano-sized gold motor; (b) SEM image of a silica disk including the plasmonic motor; (c) electric field and Poynting vector induced on the motor at an illumination wavelength of $\lambda = 810$ nm; (d) electric field and Poynting vector induced on the motor at an illumination wavelength of $\lambda = 1700$ nm

米粒子 (dipolar plasmonic core-shell nanoparticle) 上产生负光力矩, 并且其大小可以被进一步增强。

4 光力矩增强机制

为了尽可能地提高旋转效率, 丰富光驱动旋转机械 (optically-driven rotary micromachines) 的应用^[91], 需要增强光力矩。光力矩可以通过设计物质结构或结构照明来增强, 后者包括“牵引光束”和携带 SAM 的光束^[45]。

由于双折射粒子在光束的普通和特殊分量之间会产生相位延迟, 因此可以被用来通过圆偏振反转入射光的 SAM 来增强光力矩, 旋转方向 (逆时针或顺时针) 取

决于捕获光束圆偏振的惯用手性^[92-93]。放置在均匀各向异性介质中的量子发射器会产生自感力矩, 在由各向异性确定的方向上对齐, 以最大限度提高其辐射效率。而与具有最高天然各向异性的传统各向异性晶体相比, 具有双曲色散的各向异性超材料的自感力矩有 2 个数量级以上的增强^[94]。Iihama 等^[95]研究了不同厚度 FeCo/Pt 异质结构中的光学螺旋感应力矩 (即光学自旋力矩矢量, 这种力矩具有类似磁场的性质, 即力矩大小与复电场和其共轭的叉乘成正比), 发现薄膜平面的面内场状光学自旋力矩 (图 9) 随着铁磁层 (FeCo) 厚度的减小而显著增加, 面内力矩可能是由界面 SAM-OAM 耦合产生的自旋引起的, 这展现了力矩的界面性。

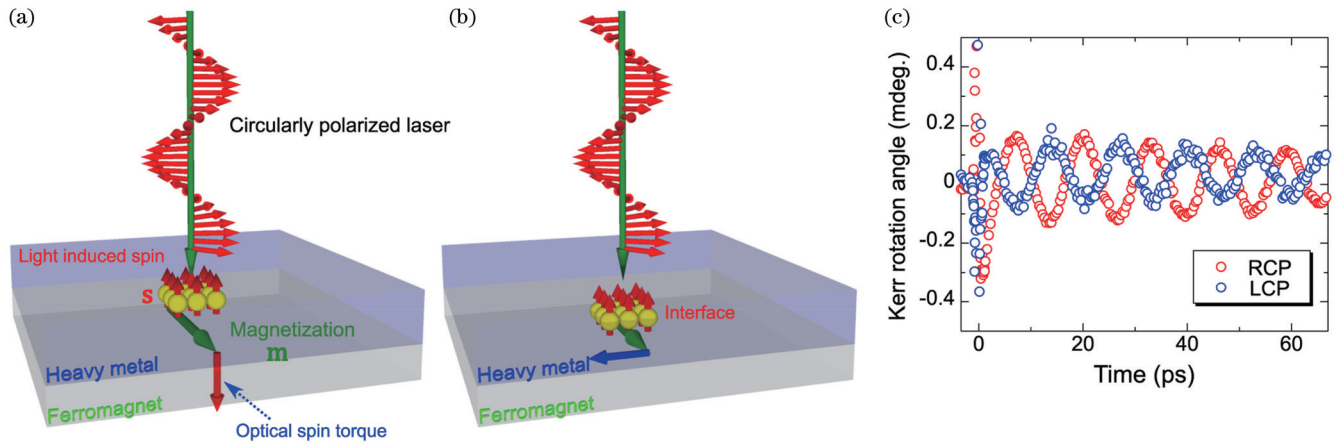


图 9 圆偏振激光由于界面 SAM-OAM 耦合引起的自旋力矩^[95]

Fig. 9 Spin torque from the SAM-OAM coupling at an interface excited by a circularly polarized light^[95]

Lee 等^[45]提出了一个基于结构照明的计算机优化数值框架, 该框架使任意散射体上的光力或力矩最大化, 并且与圆偏振平面波相比, 该模型的等离激元纳米颗粒上的单位强度的光力矩增强了 20 倍。通过使用结构照明, 可以更有效地激发高阶共振, 这有助于获得更高的光力矩。此外, 他们还考虑到了优化的鲁棒性与增强性之间的平衡。

通过线偏振光束获得的光力矩比使用结构光束获得的光力矩大 3 个数量级, 这种光力矩通过旋转与其连接的谐振环 (图 10) 将光束传递到目标上, 该方案可以同时增加力臂和力幅值。仅使用谐振环和波导支持的线性偏振光学模式, 通过谐振器上的不对称力分布和支撑轴的辅助, 可以将入射光束的线性动量转换为光力矩。力臂的机械可调性是此方案的一个巨大优势^[43]。

等离激元共振处的强光子散射和吸收, 也使用了几种等离激元结构来显著增强光力矩, 包括平面万字形^[44]、三角形和方形粒子^[37], 纳米棒^[96-97]以及 V 形结构^[98-99] (图 11)。对于平面万字形结构的等离激元结构模式, 由于与光的强烈相互作用, 尺寸仅为 100 nm 的单个等离激元电机可以产生足以在水中驱动 μm 大小

的硅胶盘 (体积大 4000 倍) 的力矩。该力矩完全由等离激元结构的对称性及其与光的相互作用产生, 它不需要任何预定的光的角动量, 因此照明光源可以是简单的线偏振平面波或高斯光束^[44]。多极等离激元产生的散射主导的光力矩, 其离散旋转对称性的阶数越低, 谐振力矩增强就越显著^[37]。由于光力、光力矩、吸收功率与激光通量呈线性相关, 对于操纵金、银纳米棒来说, 一味地增加激光功率来增强光力矩并不是最好的选择, 还要考虑等离激元加热问题, 所以要选择最合适的波长, 在增加力矩的基础上保证较少的热量产生^[100]。此外, 瑞典查尔姆斯理工大学 Shao 等^[96]选择使用长度为 130~190 nm、直径为 65~85 nm 的金纳米棒电机, 其较低的对称性、较大的尺寸以及光散射促进的角动量转移, 使得吸收与激光加热问题显著减少, 具有稳定耐用的旋转性能。单元 V 形纳米结构沿垂直于光轴的对称轴承受光力矩, 这种横向力矩不仅很大程度上依赖于波长, 还依赖于偏振状态, 包括照明光的旋转方向^[98]。

此外, 利用多重散射的等离激元耦合证明了由双层银粒子^[101]和两个金纳米棒^[97]组成的光学扭曲上的光力矩增强。光学扭曲是指每个物体上的力矩大小都

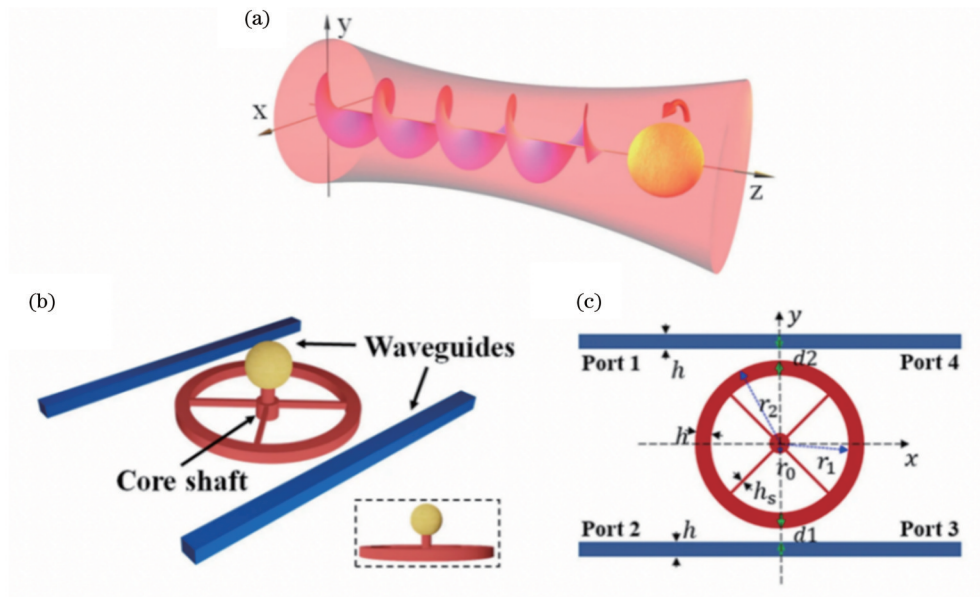


图 10 谐振环增强光力矩^[43]

Fig. 10 Enhancing the optical torque by the ring resonator^[43]

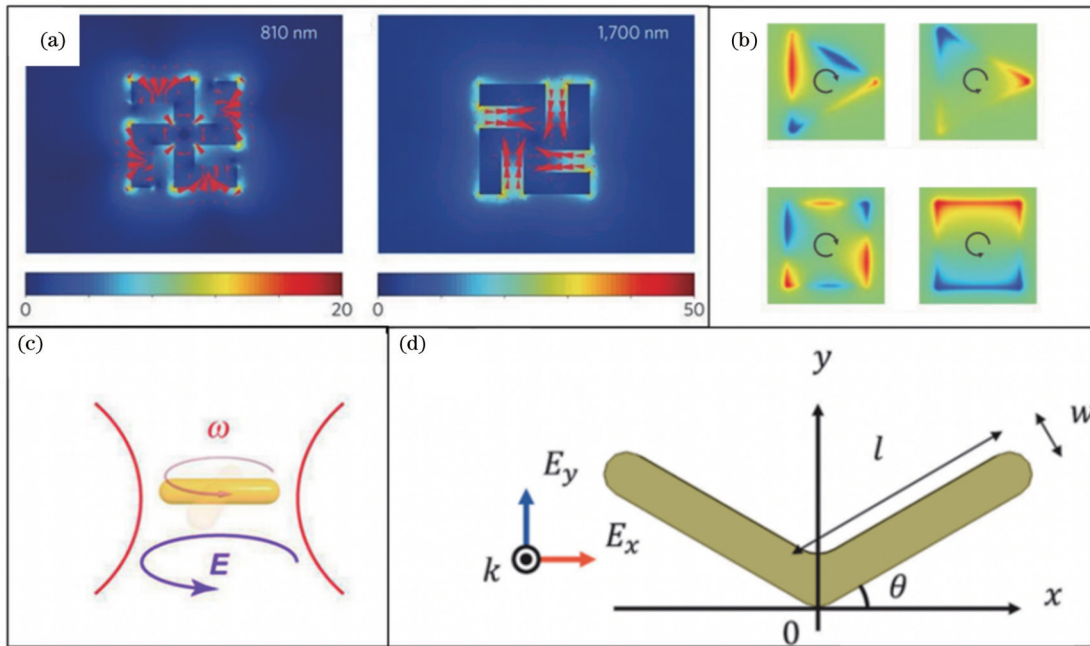


图 11 多种等离激元结构增强光力矩。(a)平面万字形粒子^[44]；(b)三角形和方形粒子^[37]；(c)纳米棒^[96-97]；(d)V型粒子^[98]

Fig. 11 Enhancing optical torques by different plasmonic structures. (a) Chiral particles^[44]; (b) triangular and rectangular particles^[37]; (c) nanorod^[96-97]; (d) V-shape particle^[98]

相等但方向相反,这种方法表现出前所未有的大力矩与光消光或吸收比,使有限的光能够在加热不严重的情况下施加相对较大的力矩^[101]。

最近,来自中国的 Shi 等^[47]发现增益材料还可以感应出巨大的光力矩,其振幅是普通有损对应物的数百倍。具有电环形偶极子和磁多极子的超复合模式可以产生较大的光力矩,这些模式是由强电共振和磁共振在具有光学增益的三棱镜内引起的(图 12)。

以上模式产生强光力矩依赖于物质的组成材料、复杂构型或颗粒的大尺寸。与均质金纳米颗粒相比,

作用在由两个线偏振平面波组成的干涉场照亮的偶极等离体超薄壳厚度的 Au-Ag 核壳纳米颗粒(通过涂覆极薄的 Ag 壳,其厚度仅为 Au 颗粒的 1/30)上的横向光力矩(围绕垂直于波传播方向的轴旋转)可以显著提高两个数量级(400 倍)以上。与大多数模式增强纵向光力矩(通常围绕光传播轴旋转)相比,增加了额外旋转自由度的应用^[91]。

另外,向列液晶主体中的寡噻吩染料也可以增强光力矩^[102],它与染料分子在各向异性溶剂(向列液晶)中形成聚集体以及双光子效应有关。近年来,低聚硫

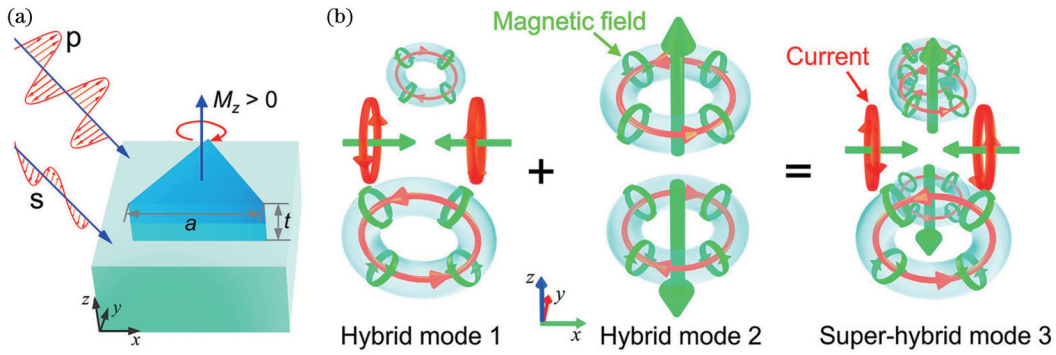


图 12 电环形偶极子和磁多极子形成的超复合模式增强正负光力矩^[47]。(a)边长为 a 、厚度为 t 的三角棱镜所受的光力矩示意图(顺时针旋转方向与光的偏振旋转方向相同,为正能量矩);(b)在棱镜中诱导的 3 种超复合模式示意图(红线表示电位移电流,绿线表示磁通量)

Fig. 12 Enhancing positive and negative optical torques by superhybrid modes from the combination of the electric toroidal dipole and magnetic multipoles^[47]. (a) Schematics of optical torque on the triangular prism with side a and thickness t (clockwise rotation corresponds to the positive optical torque); (b) illustration of three hybrid modes induced in the prism (red lines represent electric displacement current, green lines represent magnetic flux)

噻吩家族的新型染料被开发出来,有望成为有效的光力矩增强剂^[103]。

5 光力矩应用

光力矩有使其他微观物质产生旋转的效果。在过去一段时间里,科学家们已经研究了非球形粒子在真空中的旋转运动^[104-110]。研究发现,不同偏振的激光诱导二氧化硅纳米哑铃会有不同的旋转运动。

在线偏振光镊中,当椭球体的长轴与电场方向一致时,椭球体的势能处于极小值,因此实验中可以观察到纳米哑铃以偏振方向为轴作扭转振动;而在圆偏振光镊中,由于椭球所在平面受到的电场以恒定速率转动,纳米哑铃会沿同一方向不停旋转^[104-105, 108]。来自美国麻省理工学院的 Ahn 等^[42, 110]实现了纳米颗粒的最高转动频率新纪录——5 GHz,并提出高速旋转的纳米颗粒能够在现实条件中检测真空摩擦,有助于研究纳米尺度磁性和量子几何相位。

5.1 物理应用

5.1.1 纳米扭秤及扭矩扳手

鉴于椭球形纳米颗粒在线偏振光镊中会一定程度地扭曲光的偏振特性,可将其视作超灵敏的纳米级扭秤,其在 300 K 的温度下灵敏度可达 $2 \times 10^{-29} \text{ nm} / \sqrt{\text{Hz}}$ ^[105]。在此基础之上,该纳米级扭秤也可以检测卡西米尔扭矩并探究引力的量子性质^[110-111]。

除此之外,斯坦福大学的 Gutierrez-Medina 等^[112]在 2010 年设计出一款更精密的装置,即 OTW,可以在对捕获粒子施加力矩的同时直接测量施加的力矩和力。装置示意图如图 13 所示,其中:红色光路为捕获光束;灰色轴为与扭矩产生和检测相关的光轴,同时也展示了偏振状态;蓝色光路为对样品照明的蓝色 LED 光源。

原理简述如下:红色光路即为近红外线捕获光束,

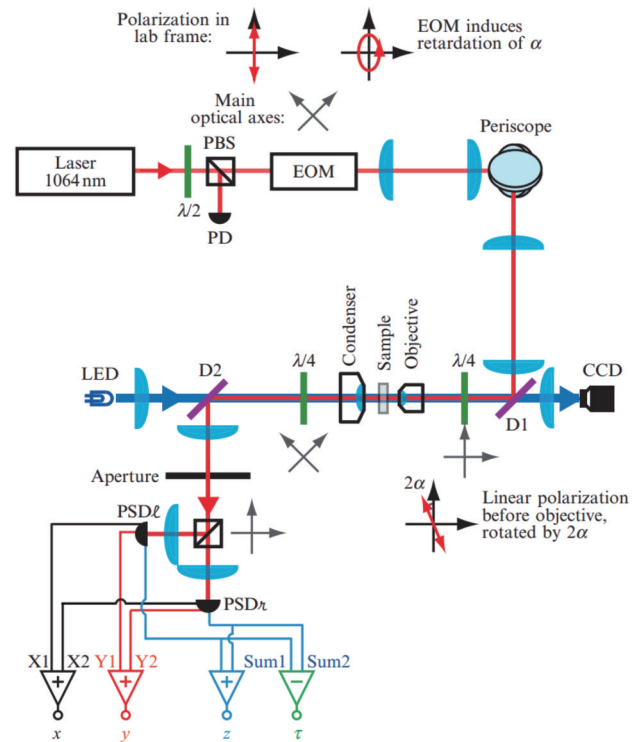


图 13 OTW 装置示意图^[112]
Fig. 13 Setup of the OTW^[112]

其功率受二分之一波片和偏振分束器影响,具有高纯度线性偏振;后又利用 EOM 和四分之一波片控制光束的偏转角度与原偏振面相差 2θ (θ 为光束通过 EOM 时不同相位延迟引起的相位差,大小与外加电压有关);最终光束通过偏振分束器,将左右旋的光束分量分别映射成垂直和水平线偏振,由探测器检测数值并处理为粒子的位移和力矩。

大多数光镊实验都用到了此装置,如旋转 DNA^[113-121]、精密测量^[81-82, 112, 122-123]、液体粘度测定^[124-129]

等。可以说是光镊定量实验的基础。

5.1.2 微机械

在圆偏振光中驱动旋转的双折射粒子可以拓展到不同结构。当被驱动的颗粒带有特定结构的时候,该系统也有不同的功能。2014 年, Liaw 等^[130]首次使用光驱动金纳米棒旋转[图 14(a)],通过实验发现,当激光频率与微粒的纵向表面共振频率(LSPR)相同时能达到最大的光力矩。在此基础之上,2015 年的一项研究表明,单个等离激元纳米棒在低至 mW 的光驱动下在水溶液中可以以超过 40 kHz 的频率旋转^[96]。转动频率高、稳定、功耗低等优点使等离激元纳米棒成为优质的纳米马达。该结构也通常用于微流搅拌等应用的旋转电机^[96, 130-139]。

鉴于双光子聚合技术的发展,阿基米德微螺钉[图 14(b)]的制备也相对简单,经常用于微流体应用^[131, 136]。它能在一个空心的通道中有效地单向输送

液体,而它的尺寸形状等各方面都会对其旋转稳定性、输送效率产生影响。2015 年,中台科技大学的 Lin 等^[131]发现螺纹的厚度会影响旋转的稳定性,而中心杆的存在有助于螺钉以激光为轴绕轴自旋,但也一定程度上降低了叶片的有效曝光面积进而影响转速。

多个粒子同时旋转组成的结构[图 14(c)]也可以用于流体运输^[133, 136]。自旋双折射球霰石粒子会影响周围液体的流动,且距离为 l 处的流体流速 u 满足:

$$u = \frac{R^3}{l^3} \omega \times l, \quad (16)$$

式中: R 为粒子半径; ω 为粒子旋转角速度。

因此,两个反向自旋的双折射球霰石粒子在微通道中对称分布,会对微通道中间的流体产生定向的位移。粒子紧靠微通道壁能有效地缓解流体反向流动造成的阻碍,最高流速可达 $8.3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 流量可达 $200 \text{ fL}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[136]。

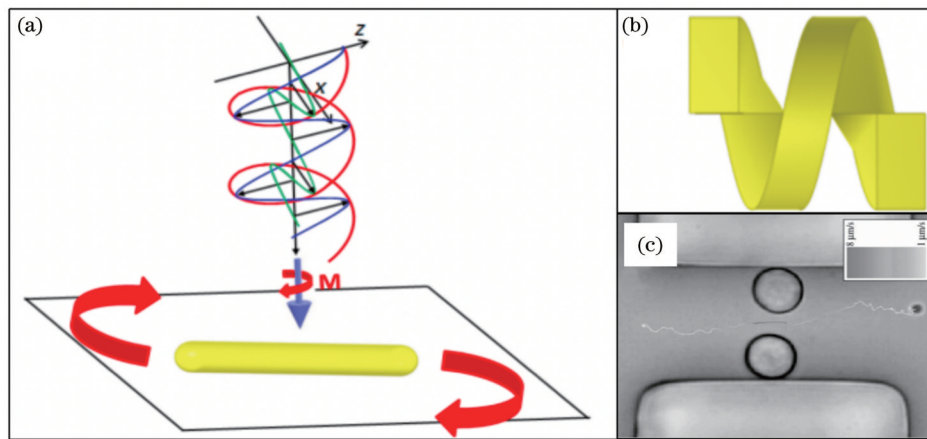


图 14 微机械示例图。(a)圆偏振光驱动金纳米棒旋转^[130, 135]; (b)阿基米德微螺钉示意图^[135]; (c)微通道中两个粒子反向旋转传输液体^[136]

Fig. 14 Examples of micromechanics. (a) Rotation of the gold nanorod by a circularly polarized light^[130, 135]; (b) illustration of the Archimedes micro-screw^[135]; (c) rotating the liquid by two particles with opposite optical torques in the microchannel^[136]

上述装置便于精确输送少量液体,但由于微流通道的存在限制了其适用系统。Ladavac 等^[133]用光学涡流代替粒子旋转,实现了微流控泵的高适配性。

5.2 生物应用

5.2.1 DNA 等生物分子性质测量

光镊是一种非侵入性操纵颗粒的方法,不会对生物分子和细胞产生危害,因此通常用于生物分子的捕获与物理特性研究。在大部分的研究实验中,研究人员通常令激光形成光势阱,从而捕获一个稳定的颗粒载体,并将被研究的生物分子(如 DNA)的一段附着在载体颗粒(通常为石英圆柱体)^[41, 113-120]上,另一端连接到一固定表面或固定粒子。这样一来,通过 OTW 技术即可研究分子的扭转特性,装置示意图如图 15 所示。其中,石英圆柱体的高度大于其直径,导致粒子在圆柱体轴与激光传播方向对齐。DNA 分子通过多个生物素-链霉亲和素链接连接到圆柱体的底部,另一端

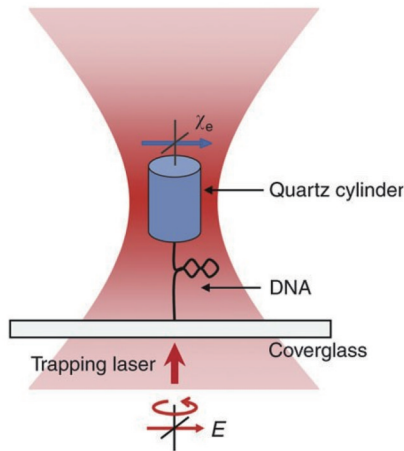
通过多个高氧合蛋白-抗高氧合蛋白链接连接到盖玻璃表面。

一般来说,对于一个角捕获粒子,力矩信号(单位为 V)与光镊偏振产生的粒子角位移 θ 的关系式为

$$V_{\tau} = V_0 \sin(2\theta), \quad (17)$$

式中: V_{τ} 为扭矩传感器的输出信号; V_0 为粒子准静止时产生的扭矩信号。为测得 V_0 的具体大小,通常利用快速旋转激光偏振方向使粒子保持准静止^[114]。因此对于小角度旋转而言, $\theta \approx V_{\tau}/2V_0$, 即扭矩信号可以直接反应角捕获粒子的小幅度旋转角度。

在研究单链 DNA 时,需要将载体颗粒与固定平面拉开一定距离以分离 DNA。其研究方法主要为恒力法^[113, 118], 即保持施加在载体颗粒上的微小拉力从而对 DNA 提供恒定张力。而美国康奈尔大学的 Gao 等^[119]认为,力检测器零点的校准需要将载体颗粒靠近固定平面以近似零力条件,因此在力足够小的情况下可能

图 15 DNA 扭转装置示意图^[118]Fig. 15 Schematic of the setup for twisting DNA^[118]

会产生力偏移,故进一步提出恒延伸法,将载体颗粒与固定平面的距离(即DNA的延伸长度)作为参考标准,提供了新的框架^[115,117]。

5.2.2 生物流变学及传感器

已知在圆偏振光束驱动下,粒子将以恒定的速度自旋,这表明光力矩会被周围介质的粘性阻力所平衡,因此一定扭矩下的粒子旋转速度可以用于计算液体粘度^[53,124-129,140]。当激光驱动粒子转动后,圆偏振度会发生改变,产生改变的反力矩已由文献^[126]给出:

$$\tau_R = \Delta\sigma P / \omega, \quad (18)$$

式中: $\Delta\sigma$ 是圆偏振的改变量; P 为激光功率; ω 为光场的角频率。

在低雷诺数流动中,流体对颗粒的阻尼力矩为

$$\tau_D = 8\pi\eta R^3 \Omega, \quad (19)$$

式中: η 为流体的粘度系数; R 为颗粒半径; Ω 为颗粒的旋转角频率。

由平衡条件可得粘度系数的计算公式为

$$\eta = \Delta\sigma P / (8\pi\alpha^3 \Omega \omega). \quad (20)$$

因此,当控制一定的旋转速度时,仅需测量圆偏振的改变量就可以得出颗粒周围的液体局部粘度。由于光镊的温和性不会对生物结构产生破坏,该技术往往用于测量不同生物体液的粘度,如细胞内液^[53,128-129]、眼泪^[127]等,为生物学的发展提供了很好的技术手段。

5.2.3 生物混合微型机器人

生物材料具有可自我修复、自我组装的独特特性,且其所含的特殊传感结构(如鞭毛)具有极其特殊的细胞功能^[141]。因此,将部分细菌和原生动物的微生物作为受控物体并利用其特殊细胞功能也是微型机器人研究发展的一大方向。光作为一种远程控制和传输能量的介质,在此类生物混合微型机器人的发展中起到至关重要的作用,如光镊捕获细胞^[142-144]、利用趋光性引导微生物定向移动^[142-144]、利用紫外线曝光影响细胞运动特性^[143-144]等。在这里,仅介绍微生物的旋转。

微生物的旋转有两大因素:光力矩的影响和微生物自生趋光性的作用。图16展示了莱茵衣藻(CR)单细胞的受控旋转。其中CR中央陷阱即为光镊,其光力矩会导致CR逆时针旋转。在其周围施加顺时针扫描的环形陷阱,会使CR旋转速度降低。当扫描环形陷阱功率大于35 mW时,CR改为顺时针旋转,且转速随扫描环形陷阱功率增加而增大^[142]。图16(a)~(c)中:i图为原理图,向下和向左曲线箭头分别表示CR的旋转和环形扫描陷阱的方向;ii~v图显示了旋转CR的显微图像,其中,圆环箭头表示旋转方向,单箭头表示旋转时CR上的参考点。

值得指出的是,定向旋转中的微生物除了可以微流搅拌和携带介质^[144],更具有破坏一定程度的生物聚集体的功能^[142],具有体外生物医学应用的巨大潜力。

6 结束语

首先对正负光力矩产生的几种方式进行了讨论。正光力矩目前主要由光的SAM传递、光的OAM传递、光的SAM-OAM耦合产生。负光力矩主要由特殊的粒子(粒子簇、粒子对、手性粒子、等离激元)或者特殊的方式(线性动量转化)产生。通常情况下,由于光力矩的大小较小,只适用于较微小的粒子,因此,进一步增强光力矩成为了很多研究团队的研究目标。介绍了几种传统的力矩增强方式,如谐振环、利用等离激元等,也对新技术——多极子结构增强光力矩进行了讨论。最后,介绍了光力矩在物理和生物上的重要应用。

利用光力矩可以实现对粒子的捕获、操控、旋转,为光学操控带来了更多的机遇。光力矩光镊操控技术将早期光镊技术的利用光力实现平面移动提升到实现颗粒旋转,从而大大提高其操控颗粒的能力。结合光流控技术,通过流体的传输作用,光力矩可以辅助光镊快速捕获溶液中的任意颗粒,并对其进行光子的力矩的传递。光力矩技术具有无接触的特点,可以操控细胞、病毒等较难操控的生物颗粒,因此在生物领域有很好的前景。光力矩技术丰富了光镊颗粒操控的功能,在物理领域和生物领域都有重要的应用:在物理领域中,OTW可以实现精密测量、液体粘度测定等,以光力矩技术为基础的微机械可以实现微流搅拌等功能;在生物领域中,通过OTW技术即可研究分子的扭转特性,实现旋转DNA的应用;在生物流变学中,光力矩技术可以测量不同生物体液的粘度。

但光力矩操控目前在很多方面仍然具有很大的改进空间。例如:光力矩普遍大小较小,难以操控大尺寸的颗粒;旋转效率也较低,为光驱动旋转微机带来了一些困难。传统的光力矩增强方式,如谐振环增强光力矩、干涉法增强光力矩、等离激元增强光力矩等,往往设计复杂,且大多设计通常仅能增强一个数量级。利用复合模式下的多极子可以实现光力矩的进一步增强,但也通常只能提升两个数量级。因此,亟须一个设

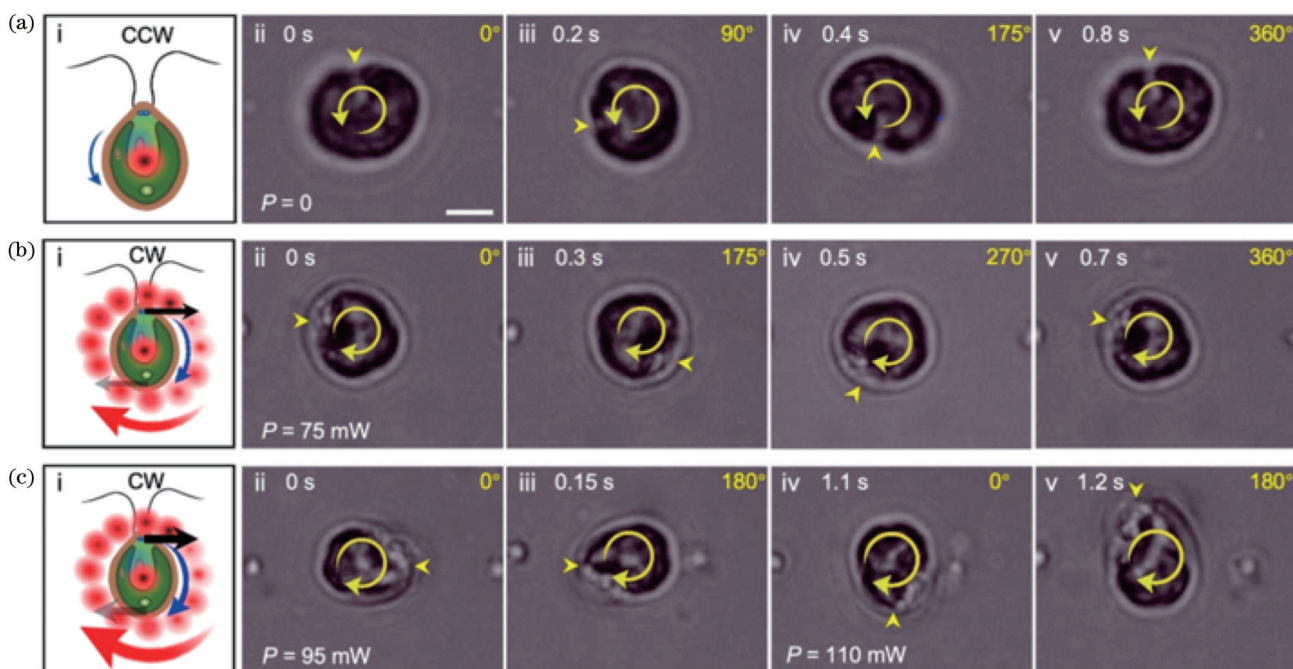


图 16 控制 CR 的旋转示意图^[142]。(a)没有环形扫描陷阱,CR 逆时针旋转;(b)应用环形扫描陷阱(75 mW)后,CR 顺时针旋转;(c)随着扫描阱功率的增大(ii和iii: 95 mW, iv和v: 110 mW),CR 转速增大

Fig. 16 Controllable rotation of CR^[142]. (a) Without the scanning trap, the CR rotated counterclockwise; (b) with the scanning trap applied (75 mW), the rotation is reversed to clockwise; (c) as the power of the scanning trap is increased (ii and iii: 95 mW, iv and v: 110 mW), the clockwise rotation speed increased

计较为简单,且可以进一步增强光力矩的方式,这将有利于实现许多生物医学的应用,例如增大后的光力矩可以将 OTW 粘度测量的数量级提升 2~3 个。要想实现此功能,需要对光场和流场进行进一步的优化,以获得更大的光力矩。

同时,拓扑光力的理论研究在 2022 年被首次提出^[145],将拓扑概念引入连续域中的束缚态周围的光力,并为实现光力涡旋和增强可逆力以操纵纳米颗粒和流体流动创造了机会。同时,这也为负力矩的产生提供了全新的思路。未来可从拓扑光力施加的光力矩入手,进行进一步的研究。

目前光力矩操控的实验现象还不是很明显,通过研究光子与物体之间的力矩传输过程,进一步提高力矩传输效率,可以实现微型扭矩测量。此外,结合纳米加工技术和微纳光学技术,定向设计超表面的衍射性质,有望实现超表面转子的定向转弯,从而实现光驱动机器人的多维运动自由控制。利用激光实现纳米粒子的高速旋转,有助于量子效应的揭示。可以预见,光力矩将会在生物医学和物理科学等领域得到更加广泛的应用。

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] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4): 156-159.
- [3] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams[J]. *Nature*, 1987, 330(6150): 769-771.
- [4] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria[J]. *Science*, 1987, 235(4795): 1517-1520.
- [5] Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 94(10): 4853-4860.
- [6] Ashkin A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. *Biophysical Journal*, 1992, 61(2): 569-582.
- [7] Ashkin A. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 841-856.
- [8] Ashkin A. Trapping of atoms by resonance radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1978, 40(12): 729-732.
- [9] Ashkin A. Applications of laser radiation pressure[J]. *Science*, 1980, 210(4474): 1081-1088.
- [10] Ashkin A, Dziedzic J M. Internal cell manipulation using infrared laser traps[J]. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 1989, 86(20): 7914-7918.
- [11] Juan M L, Righini M, Quidant R. Plasmon nano-optical tweezers[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 349-356.
- [12] Neuman K C, Nagy A. Single-molecule force spectroscopy: optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy [J]. *Nature Methods*, 2008, 5(6): 491-505.
- [13] Grigorenko A N, Roberts N W, Dickinson M R, et al. Nanometric optical tweezers based on nanostructured substrates [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(6): 365-370.
- [14] Young A W, Eckner W J, Schine N, et al. Tweezer-programmable 2D quantum walks in a Hubbard-regime lattice[J]. *Science*, 2022, 377(6608): 885-889.
- [15] Pool R. Trapping with optical tweezers[J]. *Science*, 1988, 241

- (4869): 1042.
- [16] 陈朋, 党雨婷, 钟慧, 等. 基于 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式共存的单光纤光镊实现生物细胞多路捕获和操纵[J]. 光学学报, 2023, 43(4): 0406004.
Chen P, Dang Y T, Zhong H, et al. Single-fiber optical tweezer based on coexistence of LP₀₁ and LP₁₁ modes for multiplexed capture and manipulation of biological cells[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(4): 0406004.
- [17] Đorđević T, Samutpraphoot P, Ocola P L, et al. Entanglement transport and a nanophotonic interface for atoms in optical tweezers[J]. Science, 2021, 373(6562): 1511-1514.
- [18] Zhuang X W. Unraveling DNA condensation with optical tweezers[J]. Science, 2004, 305(5681): 188-190.
- [19] Norcia M A, Young A W, Eckner W J, et al. Seconds-scale coherence on an optical clock transition in a tweezer array[J]. Science, 2019, 366(6461): 93-97.
- [20] Anderegg L, Cheuk L W, Bao Y, et al. An optical tweezer array of ultracold molecules[J]. Science, 2019, 365(6458): 1156-1158.
- [21] Kaufman A M, Lester B J, Reynolds C M, et al. Two-particle quantum interference in tunnel-coupled optical tweezers[J]. Science, 2014, 345(6194): 306-309.
- [22] Zhou J X, Qian H L, Chen C F, et al. Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(23): 11137-11140.
- [23] Schleier-Smith M. Solving a puzzle with atomic qubits[J]. Science, 2022, 376(6598): 1155-1156.
- [24] Kuo S C, Sheetz M P. Force of single kinesin molecules measured with optical tweezers[J]. Science, 1993, 260(5105): 232-234.
- [25] Ge J H, Bian X, Ma L, et al. Stepwise membrane binding of extended synaptotagmins revealed by optical tweezers[J]. Nature Chemical Biology, 2022, 18(3): 313-320.
- [26] Peddireddy K R, Clairmont R, Neill P, et al. Optical-Tweezers-integrating-Differential-Dynamic-Microscopy maps the spatiotemporal propagation of nonlinear strains in polymer blends and composites[J]. Nature Communications, 2022, 13: 5180.
- [27] Vogt N. High-resolution optical tweezers[J]. Nature Methods, 2021, 18(4): 333.
- [28] Dai X, Fu W H, Chi H Y, et al. Optical tweezers-controlled hotspot for sensitive and reproducible surface-enhanced Raman spectroscopy characterization of native protein structures[J]. Nature Communications, 2021, 12: 1292.
- [29] Madsen L S, Waleed M, Casacio C A, et al. Ultrafast viscosity measurement with ballistic optical tweezers[J]. Nature Photonics, 2021, 15(5): 386-392.
- [30] Koch S, Yeh R. Versatile control system for automated single-molecule optical tweezers investigations[J]. Nature Precedings, 2010, 4(1): 2374.
- [31] Thomas J. Optical tweezers, stat![EB/OL]. [2023-03-02]. <https://www.nature.com/articles/nnano.2007.8>.
- [32] Diekmann R, Wolfson D L, Spahn C, et al. Nanoscopy of bacterial cells immobilized by holographic optical tweezers[J]. Nature Communications, 2016, 7: 13711.
- [33] 徐律涵, 张亚磊, 刘志强, 等. 四电极液晶可调光楔驱动方法[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1323001.
Xu L H, Zhang Y L, Liu Z Q, et al. Driving method of four-electrode liquid crystal adjustable optical wedge[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1323001.
- [34] 李炬, 陈熙熙, 张垚, 等. 可变焦叶绿体光学微透镜[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0411003.
Li H, Chen X X, Zhang Y, et al. Chloroplast optical microlens with variable focus[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0411003.
- [35] He L, Li H A, Li M. Optomechanical measurement of photon spin angular momentum and optical torque in integrated photonic devices[J]. Science Advances, 2016, 2(9): e1600485.
- [36] Friese M E J, Enger J, Rubinsztein-Dunlop H, et al. Optical angular-momentum transfer to trapped absorbing particles[J]. Physical Review A, 1996, 54(2): 1593-1596.
- [37] Lee Y E, Fung K H, Jin D F, et al. Optical torque from enhanced scattering by multipolar plasmonic resonance[J]. Nanophotonics, 2014, 3(6): 343-350.
- [38] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Optical torque controlled by elliptical polarization[J]. Optics Letters, 1998, 23(1): 1-3.
- [39] Tong L M, Miljković V D, Käll M. Alignment, rotation, and spinning of single plasmonic nanoparticles and nanowires using polarization dependent optical forces[J]. Nano Letters, 2010, 10(1): 268-273.
- [40] Liaw J W, Lo W J, Kuo M K. Wavelength-dependent longitudinal polarizability of gold nanorod on optical torques[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10858-10867.
- [41] Oroszi L, Galajda P, Kirei H, et al. Direct measurement of torque in an optical trap and its application to double-strand DNA [J]. Physical Review Letters, 2006, 97(5): 058301.
- [42] Ahn J, Xu Z J, Bang J, et al. Ultrasensitive torque detection with an optically levitated nanorotor[J]. Nature Nanotechnology, 2020, 15(2): 89-93.
- [43] Geng Y, Tan J B, Cao Y Y, et al. Giant and tunable optical torque for micro-motors by increased force arm and resonantly enhanced force[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2819.
- [44] Liu M, Zentgraf T, Liu Y M, et al. Light-driven nanoscale plasmonic motors[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(8): 570-573.
- [45] Lee Y E, Miller O D, Homer Reid M T, et al. Computational inverse design of non-intuitive illumination patterns to maximize optical force or torque[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6757-6766.
- [46] 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(2): 123-127.
- [47] Shi Y Z, Zhou L M, Liu A Q, et al. Superhybrid mode-enhanced optical torques on Mie-resonant particles[J]. Nano Letters, 2022, 22(4): 1769-1777.
- [48] Bliokh K Y, Rodriguez-Fortuno F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light[J]. Nature Photonics, 2015, 9(12): 796-808.
- [49] Bliokh K Y, Bekshaev A Y, Nori F. Extraordinary momentum and spin in evanescent waves[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3300.
- [50] Shi Y Z, Song Q H, Toftul I, et al. Optical manipulation with metamaterial structures[J]. Applied Physics Reviews, 2022, 9(3): 031303.
- [51] Asavei T, Parkin S, Persson M, et al. Engineering optically driven micromachines[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7038: 703816.
- [52] Shi Y Z, Zhu T T, Liu J Q, et al. Stable optical lateral forces from inhomogeneities of the spin angular momentum[J]. Science Advances, 2022, 8(48): eabn2291.
- [53] Bishop A I, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Optical microrheology using rotating laser-trapped particles[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(19): 198104.
- [54] 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, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [55] He H, Friese M E, Heckenberg N R, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(5): 826-829.
- [56] Simpson N B, Allen L, Padgett M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre-Gaussian modes[J]. Journal of

- Modern Optics, 1996, 43(12): 2485-2491.
- [57] Gahagan K T, Swartzlander G A. Optical vortex trapping of particles[J]. Optics Letters, 1996, 21(11): 827-829.
- [58] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. Science, 2001, 292(5518): 912-914.
- [59] Yan Z J, Scherer N F. Optical vortex induced rotation of silver nanowires[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4(17): 2937-2942.
- [60] Shen Z, Hu Z J, Yuan G H, et al. Visualizing orbital angular momentum of plasmonic vortices[J]. Optics Letters, 2012, 37(22): 4627-4629.
- [61] Zhang Y Q, Shi W, Shen Z, et al. A plasmonic spanner for metal particle manipulation[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 15446.
- [62] Zhao Y Q, Edgar J S, Jeffries G D M, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(7): 073901.
- [63] Chen J, Ng J, Ding K, et al. Negative optical torque[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6386.
- [64] Qi T L, Han F, Liu W B, et al. Stable negative optical torque in optically bound nanoparticle dimers[J]. Nano Letters, 2022, 22(21): 8482-8486.
- [65] Liaw J W, Huang M C, Chao H Y, et al. Spin and orbital rotation of plasmonic dimer driven by circularly polarized light[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1): 322.
- [66] Parker J, Peterson C W, Yifat Y, et al. Optical matter machines: angular momentum conversion by collective modes in optically bound nanoparticle arrays[J]. Optica, 2020, 7(10): 1341-1348.
- [67] Nan F, Li X A, Zhang S L, et al. Creating stable trapping force and switchable optical torque with tunable phase of light[J]. Science Advances, 2022, 8(46): eadd6664.
- [68] Han F, Yan Z J. Phase transition and self-stabilization of light-mediated metal nanoparticle assemblies[J]. ACS Nano, 2020, 14(6): 6616-6625.
- [69] Canaguier-Durand A, Hutchison J A, Genet C, et al. Mechanical separation of chiral dipoles by chiral light[J]. New Journal of Physics, 2013, 15(12): 123037.
- [70] Cameron R P, Barnett S M, Yao A M. Discriminatory optical force for chiral molecules[J]. New Journal of Physics, 2014, 16(1): 013020.
- [71] Cameron R P, Yao A M, Barnett S M. Diffraction gratings for chiral molecules and their applications[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2014, 118(19): 3472-3478.
- [72] Tkachenko G, Brasselet E. Optofluidic sorting of material chirality by chiral light[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3577.
- [73] Nieto-Vesperinas M. Optical theorem for the conservation of electromagnetic helicity: significance for molecular energy transfer and enantiomeric discrimination by circular dichroism[J]. Physical Review A, 2015, 92(2): 023813.
- [74] Wang S B, Chan C T. Lateral optical force on chiral particles near a surface[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3307.
- [75] Ding K, Ng J, Zhou L, et al. Realization of optical pulling forces using chirality[J]. Physical Review A, 2014, 89(6): 063825.
- [76] Canaguier-Durand A, Genet C. Chiral route to pulling optical forces and left-handed optical torques[J]. Physical Review A, 2015, 92(4): 043823.
- [77] Chen H J, Lu W L, Yu X N, et al. Optical torque on small chiral particles in generic optical fields[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32867-32878.
- [78] Zhang Q, Li J Q, Liu X G. Optical lateral forces and torques induced by chiral surface-plasmon-polaritons and their potential applications in recognition and separation of chiral enantiomers [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2019, 21(3): 1308-1314.
- [79] La Porta A, Wang M D. Optical torque wrench: angular trapping, rotation, and torque detection of quartz microparticles [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(19): 190801.
- [80] Pedaci F, Huang Z X, van Oene M, et al. Calibration of the optical torque wrench[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 3787-3802.
- [81] Pedaci F, Huang Z X, van Oene M, et al. Excitable particles in an optical torque wrench[J]. Nature Physics, 2011, 7(3): 259-264.
- [82] Inman J, Forth S, Wang M D. Passive torque wrench and angular position detection using a single-beam optical trap[J]. Optics Letters, 2010, 35(17): 2949-2951.
- [83] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles[J]. Nature, 1998, 394(6691): 348-350.
- [84] Mitri F G. Negative optical spin torque wrench of a non-diffracting non-paraxial fractional Bessel vortex beam[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2016, 182: 172-179.
- [85] Silva G T, Lobo T P, Mitri F G. Radiation torque produced by an arbitrary acoustic wave[J]. EPL (Europhysics Letters), 2012, 97(5): 54003.
- [86] Shao L, Käll M. Light-driven rotation of plasmonic nanomotors [J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(25): 1706272.
- [87] Chen H J, Feng L, Ma J N, et al. Left-handed optical torque on dipolar plasmonic nanoparticles induced by Fano-like resonance [J]. Physical Review B, 2022, 106(5): 054301.
- [88] Tanaka Y Y, Albella P, Rahmani M, et al. Plasmonic linear nanomotor using lateral optical forces[J]. Science Advances, 2020, 6(45): eabc3726.
- [89] Rahimzadegan A, Fruhnert M, Alaei R, et al. Optical force and torque on dipolar dual chiral particle[J]. Physical Review B, 2016, 94(12): 125123.
- [90] Wu X F, Ehehalt R, Razinskas G, et al. Light-driven microdrones[J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(5): 477-484.
- [91] Feng L, Ma J N, Lu W L, et al. Anomalously enhanced transverse optical torque on a dipolar plasmonic nanoparticle in two-wave interference[J]. Optics Letters, 2022, 47(23): 6241-6244.
- [92] Wu T, Nieminen T A, Mohanty S, et al. A photon-driven micromotor can direct nerve fibre growth[J]. Nature Photonics, 2012, 6(1): 62-67.
- [93] Arita Y, Mazilu M, Dholakia K. Laser-induced rotation and cooling of a trapped microgroscope in vacuum[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2374.
- [94] Ginzburg P, Krasavin A V, Poddubny A N, et al. Self-induced torque in hyperbolic metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2013, 111(3): 036804.
- [95] Iihama S, Ishibashi K, Mizukami S. Interface-induced field-like optical spin torque in a ferromagnet/heavy metal heterostructure [J]. Nanophotonics, 2021, 10(3): 1169-1176.
- [96] Shao L, Yang Z J, Andrén D, et al. Gold nanorod rotary motors driven by resonant light scattering[J]. ACS Nano, 2015, 9(12): 12542-12551.
- [97] Wu A A, Tanaka Y Y, Shimura T. Plasmon-hybridization-induced optical torque between twisted metal nanorods[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 2398-2410.
- [98] Fukuhara R, Tanaka Y Y, Shimura T. Transverse optical torque induced by localized surface plasmons[J]. Physical Review A, 2019, 100(2): 023827.
- [99] Liesener J, Reicherter M, Haist T, et al. Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms[J]. Optics Communications, 2000, 185(1-3): 77-82.
- [100] Liaw J W, Lo W J, Lin W C, et al. Theoretical study of optical torques for aligning Ag nanorods and nanowires[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 162:

- 133-142.
- [101] Chen J, Wang N, Cui L Y, et al. Optical twist induced by plasmonic resonance[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27927.
- [102] Pergamenschchik V M, Multian V V, Gayvoronsky V Y, et al. Interaction of supramolecular aggregates and the enhanced optical torque on the director in a dye doped nematic liquid crystal [J]. *Soft Matter*, 2019, 15(43): 8886-8895.
- [103] Kosa T, Palffy-Muhoray P, Zhang H, et al. Large optical torque enhancement by oligothiophene dye in a nematic liquid crystal host[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, 421(1): 107-115.
- [104] Xu Z J, Li T C. Detecting Casimir torque with an optically levitated nanorod[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(3): 033843.
- [105] Hoang T M, Ma Y E, Ahn J, et al. Torsional optomechanics of a levitated nonspherical nanoparticle[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12): 123604.
- [106] Kuhn S, Kosloff A, Stickler B A, et al. Full rotational control of levitated silicon nanorods[J]. *Optica*, 2017, 4(3): 356-360.
- [107] Nava G, Ciciulla F, Iadlovská O S, et al. Pitch tuning induced by optical torque in heliconic cholesteric liquid crystals[J]. *Physical Review Research*, 2019, 1(3): 033215.
- [108] Van Der Laan F, Reimann R, Doderer M, et al. GHz rotation of an optically trapped nanoparticle in vacuum[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(15): 153602.
- [109] van der Laan F, Reimann R, Militaru A, et al. Optically levitated rotor at its thermal limit of frequency stability[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(1): 013505.
- [110] Ahn J, Xu Z J, Bang J, et al. Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033603.
- [111] Gutiérrez-Medina B, Peña M, Ana I, et al. Mechanical testing of particle streaming and intact extracellular mucilage nanofibers reveal a role of elastic force in diatom motility[J]. *Physical Biology*, 2022, 19(5): 056002.
- [112] Gutiérrez-Medina B, Andreasson J O L, Greenleaf W J, et al. An optical apparatus for rotation and trapping[J]. *Methods in Enzymology*, 2010, 475: 377-404.
- [113] Forth S, Deufel C, Sheinin M Y, et al. Abrupt buckling transition observed during the plectoneme formation of individual DNA molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(14): 148301.
- [114] Deufel C, Wang M D. Detection of forces and displacements along the axial direction in an optical trap[J]. *Biophysical Journal*, 2006, 90(2): 657-667.
- [115] Vanderlinden W, Skoruppa E, Kolbeck P J, et al. DNA fluctuations reveal the size and dynamics of topological domains [J]. *PNAS Nexus*, 2022, 1(5): pgac268.
- [116] Lucchetti L, Fraccia T P, Nava G, et al. Elasticity and viscosity of DNA liquid crystals[J]. *ACS Macro Letters*, 2020, 9(7): 1034-1039.
- [117] Skoruppa E, Carlon E. Equilibrium fluctuations of DNA plectonemes[J]. *Physical Review E*, 2022, 106(2): 024412.
- [118] Deufel C, Forth S, Simmons C R, et al. Nanofabricated quartz cylinders for angular trapping: DNA supercoiling torque detection [J]. *Nature Methods*, 2007, 4(3): 223-225.
- [119] Gao X A, Hong Y F, Ye F, et al. Torsional stiffness of extended and plectonemic DNA[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(2): 028101.
- [120] Sheinin M Y, Forth S, Marko J F, et al. Underwound DNA under tension: structure, elasticity, and sequence-dependent behaviors[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(10): 108102.
- [121] Harada Y, Ohara O, Takatsuki A, et al. Direct observation of DNA rotation during transcription by *Escherichia coli* RNA polymerase[J]. *Nature*, 2001, 409(6816): 113-115.
- [122] Lokesh M, Vaippully R, Bhallamudi V P, et al. Realization of pitch-rotational torque wrench in two-beam optical tweezers[J]. *Journal of Physics Communications*, 2021, 5(11): 115016.
- [123] Williams I, Oğuz E C, Speck T, et al. Transmission of torque at the nanoscale[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(1): 98-103.
- [124] Knöner G, Parkin S, Heckenberg N R, et al. Characterization of optically driven fluid stress fields with optical tweezers[J]. *Physical Review E*, 2005, 72(3): 031507.
- [125] Yao A, Tassieri M, Padgett M, et al. Microrheology with optical tweezers[J]. *Lab on a Chip*, 2009, 9(17): 2568-2575.
- [126] Nieminen T A, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H. Optical measurement of microscopic torques[J]. *Journal of Modern Optics*, 2001, 48(3): 405-413.
- [127] Parkin S J, Knöner G, Nieminen T A, et al. Picoliter viscometry using optically rotated particles[J]. *Physical Review E*, 2007, 76(4): 041507.
- [128] Rodríguez-Sevilla P, Zhang Y H, de Sousa N, et al. Optical torques on upconverting particles for intracellular microrheometry [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(12): 8005-8014.
- [129] Yoon Y Z, Kotar J, Yoon G, et al. The nonlinear mechanical response of the red blood cell[J]. *Physical Biology*, 2008, 5(3): 036007.
- [130] Liaw J W, Chen Y S, Kuo M K. Rotating Au nanorod and nanowire driven by circularly polarized light[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26005-26015.
- [131] Lin C L, Lin Y S, Baldeck P. Rotational efficiency of photo-driven Archimedes screws for micropumps[J]. *Micromachines*, 2015, 6(6): 674-683.
- [132] Metzger N K, Mazilu M, Kelemen L, et al. Observation and simulation of an optically driven micromotor[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(4): 044018.
- [133] Ladavac K, Grier D G. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays[J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1144-1149.
- [134] Šipová-Jungová H, Andrén D, Jones S, et al. Nanoscale inorganic motors driven by light: principles, realizations, and opportunities[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(1): 269-287.
- [135] Lin C L, Vitrant G, Bouriau M, et al. Optically driven Archimedes micro-screws for micropump application[J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8267-8276.
- [136] Mushfique H, Leach J, Di Leonardo R, et al. Optically driven pumps and flow sensors for microfluidic systems[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2008, 222(5): 829-837.
- [137] Kuhn S, Stickler B A, Kosloff A, et al. Optically driven ultra-stable nanomechanical rotor[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1670.
- [138] Li T, Ahn J, Xu Z, et al. Optically levitated torque sensor and ultrafast nanomechanical rotor[C]// *Conference on Lasers and Electro-optics*, May 13-18, 2018, San Jose, California, United States, paper JF3B.3.
- [139] Nikkhou M. Optical control of a nanomechanical rotor[C]// *Optical Trapping and Optical Micromanipulation XVII*, August 21, 2020, Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers(SPIE): 11463.
- [140] Lin C L, Wang I, Dollet B, et al. Velocimetry microsensors driven by linearly polarized optical tweezers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 329-331.
- [141] Nocentini S, Parmeggiani C, Martella D, et al. Optically driven soft micro robotics[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(14): 1800207.
- [142] Xin H B, Zhao N, Wang Y N, et al. Optically controlled living micromotors for the manipulation and disruption of biological targets[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(10): 7177-7185.
- [143] Steager E B, Sakar M S, Kim D H, et al. Electrokinetic and optical control of bacterial microrobots[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(3): 035001.
- [144] Weibel D B, Garstecki P, Ryan D, et al. Microoxen: microorganisms to move microscale loads[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,

Optical Torques: Fundamentals and Their Applications

Tao Ye¹, Zhong Wei¹, Wu Xinyi¹, He Tao^{1,2,3,4}, Lai Chengxing¹, Wang Zhanshan^{1,2,3,4},
Shi Yuzhi^{1,2,3,4*}, Cheng Xinbin^{1,2,3,4**}

¹*Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

²*MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Shanghai 200092, China;*

³*Shanghai Frontiers Science Center of Digital Optics, Shanghai 200092, China;*

⁴*Shanghai Professional Technical Service Platform for Full-Spectrum and High-Performance Optical Thin Film Devices and Applications, Shanghai 200092, China*

Abstract

Significance Arthur Ashkin was awarded the Nobel Prize in Physics 2018 for the invention of optical tweezers and their biological applications, which fulfilled the prediction of Ashkin "I think the field of biology may win a Nobel Prize for the great work done by optical tweezers". Optical tweezers have aroused extensive attention since they were born, which manipulate tiny objects by exerting optical forces. Till now, optical tweezers have made great achievements in the field of physics, chemistry, biology, medicine and nanotechnology.

In the process of interaction between light and matter, the transfer of linear momentum and angular momentum can generate optical forces, while the angular momentum of light can also induce optical torques. Optical torques have been widely used in optical manipulation for their advantages of non-contact, small size and high precision. Optical torques provide another degree of freedom in optical manipulation, finding wide applications in biomedical, physical and quantum sciences, including the fundamental mechanical properties of biopolymers and numerous molecular machines that drive the internal dynamics of cells.

On the one hand, optical torques endow biologists with a "microscopic hand" that can minimally manipulate organisms like a microscope because of their contactless nature. As a result, optical torques can control cells, viruses and other hard-to-control biological samples, avoiding potential sample damage and making many live experiments possible. Meanwhile, using non-contact capabilities, optical torques are able to drive the internal dynamics of cells without causing any damage. This can solve many thorny problems faced by biologists. On the other hand, optical torques are usually very small, down to the magnitude of pN·nm or even fN·nm, making them ideal for precise manipulation of small objects, such as rotating DNAs and proteins. With the support of such a precise tool, the characteristics of DNAs and proteins can be studied easier.

Except for biology, optical torques also have great potential applications in physical applications. As a cutting-edge technology, optical torque wrenches have been used to measure the Casimir torque and explore the quantum properties of gravity. Besides, it is known that optical torque wrenches are the basis of optical tweezers' quantitative experiments and have been used in various optical tweezers experiments, such as precise torque measurement and liquid viscosity determination.

In the past decade, the combination of optical torques with other technologies has further expanded the impact of optical torques in the field of biology and physics. For example, optical torques can be integrated with microfluidic systems. With the help of the transmission of fluid, optical torques assist optical tweezers capture the particle in the solution and transfer the angular momentum.

Progress In this paper, we start by discussing the fundamentals and the conditions of two kinds of optical torques. By comparing the directions of optical torques and the angular momentum of the incident light, the optical torques can be classified as positive and negative optical torques. We discuss the mechanisms for the two kinds of optical torques in detail (Figs. 2–8). Then, we outline the traditional mechanisms for enhancing the optical torques, including spin-orbit coupling (Fig. 9), ring resonator (Fig. 10), and plasmonic structures (Fig. 11). Meanwhile, we introduce some leading-edge mechanisms for optical torques enhancement, like using super-hybrid modes from the combination of the electric toroidal dipole and magnetic multipoles (Fig. 12). Next, we review the physical and biological applications. In physical

applications, we discuss the setup and theory of the optical torque wrench (Fig. 13) and micromechanics using optical torque, such as the Archimedes micro-screw (Fig. 14). In biological applications, we discuss the measurement of the biomolecule, like the characteristics of twisting in DNAs (Fig. 15), and we mention applications of optical torques in biorheology, biosensors, and micro-biorobots (Fig. 16). We culminate with a summary of the challenges in optical manipulation with optical torques, as well as the outlook of future developments, such as the torque sensing in biomedicine and light-driven biorobots.

Conclusions and Prospects The capabilities of optical torques to capture, control, and rotate particles have brought more opportunities for optical manipulation, compared with the translational movement of earlier optical tweezers technology. However, optical torques still face many challenges in optical manipulation. For example, the optical torque is generally small, so it is difficult to control large-sized particles, and the rotation efficiency is low, which brings some difficulties to the light-driven rotating micromechanics. Fortunately, nontrivial theoretical studies of topological optical forces have been proposed recently, which introduce topological concepts to optical forces at bound states in the continuum. This offers opportunities to realize optical force vortices, enhanced reversible forces, and even negative torque for manipulating nanoparticles and fluid flow. In the future, optical torques caused by topological optical force can be studied further to enhance the optical torques. In addition, by designing the diffraction characteristics of the metasurface, the direction control of the meta-robot can be realized, so as to realize the multi-dimensional steering of the light-driven robot. It can be predicted that optical torques will be more widely utilized in biomedical and physical sciences and other fields.

Key words optical torque; optical tweezer; optofluidics; multifunctional control; biophysical particles