

引文格式:

顾国强, 余建, 瞿驰野, 等. 光子纳米喷流的性能及应用 [J]. 集成技术, 2024, 13(2): 89-110.

Gu GQ, Yu J, Qu CY, et al. Performance and application of photonic nanojet [J]. Journal of Integration Technology, 2024, 13(2): 89-110.

光子纳米喷流的性能及应用

顾国强^{1*} 余建¹ 瞿驰野^{1,2} 张天尧¹ 马璐¹ 张鹏程¹ 张翊¹ 杨慧^{1*}

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要 光子纳米喷流是光照射直径与波长相当或略大于波长的无损电介质微颗粒时, 会在微颗粒后表面一定距离处形成高强度、紧聚焦光束。光子纳米喷流具有大于照射光的强度、最小的半高宽值能够小于衍射极限的光束宽度、传播超出倏势场区域和较强的背向散射等优异特性, 在光信号增强、微纳加工与制造、超分辨光学成像、超灵敏捕获和探测等领域具有重要应用。该文首先介绍了光子纳米喷流的源头和发现; 其次, 对光子纳米喷流的模型、理论、形貌特征、实验测量和主要特性进行了阐述; 再次, 调研和讨论了光子纳米喷流的几个重要应用; 最后, 对光子纳米喷流进行了总结和展望。

关键词 光子纳米喷流; 微颗粒; 微透镜; 光散射; 超分辨光学成像; 光捕获和探测

中图分类号 O 436.2 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230712001

Performance and Application of Photonic Nanojet

GU Guoqiang^{1*} YU Jian¹ QU Chiye^{1,2} ZHANG Tianyao¹ MA Lu¹
ZHANG Pengcheng¹ ZHANG Yi¹ YANG Hui^{1*}

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

*Corresponding Authors: gq.gu@siat.ac.cn; hui.yang@siat.ac.cn

Abstract Photonic nanojet (PNJ) is a high intense, tightly focused light beam on the shadow side surface of lossless dielectric microparticles when the size of the particle is approximately equal to or slightly larger than the wavelength of the incident light. PNJ exhibits exceptional characteristics, including higher intensity than the incident light, the minimum full width at half-maximum less than the diffraction limit of the beamwidth,

收稿日期: 2023-07-12 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 深圳市科技计划资助项目 (JSGG20210713091807026); 深圳市基础研究资助项目 (JCYJ20210324101405016)

作者简介: 顾国强 (通讯作者), 副研究员, 研究方向为超分辨成像技术、拉曼光谱检测技术及其生物医学应用, E-mail: gq.gu@siat.ac.cn; 余建, 科研助理, 研究方向为表面增强拉曼散射; 瞿驰野, 硕士研究生, 研究方向为协同增强拉曼散射技术; 张天尧, 博士后, 研究方向为微纳成像与操作; 马璐, 硕士研究生, 研究方向为微透镜辅助的超分辨成像; 张鹏程, 助理研究员, 研究方向为基于微纳器件的生物分子传感; 张翊, 正高级工程师, 研究方向为生物医学电子仪器、精密医学诊疗器械和医疗微机电系统; 杨慧 (通讯作者), 研究员, 研究方向为生物传感与微纳技术, E-mail: hui.yang@siat.ac.cn.

propagation beyond the evanescent field region and strong backscattering. These properties make PNJ crucial in various applications such as optical signals enhancement, micro-/nano- processing and manufacturing, super-resolution optical imaging, ultra-sensitive trapping and sensing, among others. This review article begins by introducing the origins and discovery of PNJ. Subsequently, it provides an elucidation of the model, theory, morphology features, experimental measurements, and key properties of PNJ. Furthermore, the study investigates and discusses several crucial applications of PNJ. Finally, a comprehensive summary and outlook for PNJ are presented.

Keywords photonic nanojet; microparticles; microlens; light scattering; super-resolution optical imaging; optical trapping and detection

Funding This work is supported by Shenzhen Science and Technology Program (JSGG20210713091807026), and Shenzhen Fundamental Research Program (JCYJ20210324101405016)

1 引 言

新千年伊始, 激光物理学研究人员首次发现了一种源于光-颗粒相互作用的喷流状结构场增强效应^[1-2]。2004 年, 通过对平面波照射的电介质微圆柱进行数值分析, Chen 等^[3]对该现象进行了深入研究, 并正式将该现象称为“光子纳米喷流 (photonic nanojet, PNJ)”。PNJ 是一种从被照射的圆柱形或球形微颗粒 (尺寸与照射波长相当, 或略大于照射波长) 后表面发出的非共振光束, 具有最小能够小于经典衍射极限的横向光束宽度 (full width at half-maximum, FWHM)、高光强度和波长尺度的弱衍射传播距离等优异特性。

PNJ 通常以最大光强、焦距 (或工作距离)、横向光束宽度和衰减长度等参数为特征, 其形状特征和场分布取决于柱形或球形微颗粒的材料属性和几何形态、环境介质及入射光的性质 (类型、波长、偏振等)。产生 PNJ 的微颗粒形状包括柱、球、盘、方形、双层或多层、波浪形、非球对称型等多种不同的结构, 实验测量 PNJ 则通常采用显微成像方法。在过去的近二十年里, PNJ 在许多方面得到了广泛的应用, 如光信号增强、微纳加工与制造、超分辨光学成像、纳米颗

粒 (nanoparticle, NP)/细胞的捕获和探测等。

本文首先阐述了 PNJ 的源头和发现; 其次, 对 PNJ 的模型、物理机理、形状特征、实验表征和主要特性进行介绍; 再次, 介绍和讨论了 PNJ 的几个重要应用; 最后, 对 PNJ 效应进行总结和展望。

2 光子纳米喷流的源头和发现

回顾科学史, 科学家对透明微颗粒 (球、柱等) 的关注已逾两千年^[4]。很早的时候, 人们就已经认识到——阳光照射的下午是不能给花园浇水的, 因为沉积在叶子上的小水滴可能会引起叶片晒伤。公元一世纪的博物学家盖乌斯·普林尼·塞孔都斯记录了玻璃球对纸燃烧的作用, 古罗马哲学家塞涅卡指出充满水的玻璃球对很小的字具有放大效果。这些现象主要由光的折射引起。阿基米德、托勒密及大部分的古希腊和古罗马物理学家虽然对光的折射有所了解, 但光的折射定律的正确形式首先是由宗教改革时期的科学家萨尔于公元 984 年在巴格达法院发现的^[5]。之后, 托马斯·哈里奥特、约翰尼斯·开普勒、威理博·斯涅尔和勒内·笛卡儿于 17 世纪上半叶又分别重新发

现了这一定律。1662 年, 费马指出光的折射遵循费马原理, 即光线传播的路径是需时最少的路径。1678 年, 克里斯蒂安·惠更斯的研究表明, 威理博·斯涅尔的正弦定律可以用光的波动性和惠更斯·斯涅尔原理进行解释。

从历史上来看, 约翰尼斯·开普勒似乎具备了发现光的纳米喷流现象的知识基础。例如: 在很早的时候, 他就对焦点的含义和针孔相机的原理有所了解; 在他出版的书中, 对光的折射和光学成像进行了描述; 他还萌生了透镜的一般理论; 同时, 约翰尼斯·开普勒熟悉正弦定律, 并对雷蒂库斯的三角函数表和奈皮尔的对数表了如指掌。但正如熟语“折射科学”的伽利略在写给乔瓦尼·塔尔德的信中所指出的那样: “这门科学仍然不为人所完全了解, 除非唤回已逝的约翰尼斯·开普勒, 不然, 我不知道有谁会参与其中, 它如此黑暗, 也许没有人能真正理解。”即便约翰尼斯·开普勒能回世重生, 并且长命百岁, 也如同古代经院学者所辩论的关于针尖上能站多少个天使这类问题一样, 人们在那个时代怎么能问出纳米尺度的光的问题呢! 这或许能解释为什么 PNJ 没有在 17 世纪就被发现了。

从原则上讲, 不管是约翰尼斯·开普勒, 还是威理博·斯涅尔, 都能很容易地绘制出光线追迹图, 并由此看到光通过电介质球或柱后的聚焦效果^[6]。当球/柱的折射率介于 1~2 时, 形成的聚焦光束焦点位于阴影侧表面的某个距离处; 当折射率等于 2 时, 焦点恰好在阴影侧表面上; 而当折射率大于 2 时, 光被聚焦到电介质颗粒内。依据斯涅尔定律, 人们可以得到聚焦光束的焦点、焦斑和光强。瑞利勋爵在小颗粒光散射的研究中指出, 尺寸远小于光波长的电介质颗粒不能看作小的透镜, 而是要看成散射光的点电偶极子^[7]。光在其前后方向上对称分布, 没有非对称的类喷流场出现。1908 年, Gustav Mie 给出了尺寸与波长相当的球颗粒光散射的完整描述^[8]。

对于无损耗的电介质微颗粒来说, 其对光的散射与微颗粒的尺寸和折射率相关。基于 Mie 理论, 光照射微颗粒可在其阴影侧表面后形成类喷流结构的聚焦光束。这种光束最早在 Luk'yanchuk 等^[9]探讨激光清洗固体表面的光谐振和近场效应时已有所体现。2004 年, 美国西北大学的 Vadim Backman 课题组^[3]在数值分析平面波照射电介质微柱颗粒时, 将这种类喷流的光束正式命名为光子纳米喷流 (PNJ), 此后, 该名称被国际同行广泛采用。2009 年, 该小组在其出版的综述文章中初步定义了 PNJ 的概念, 即平面波照射直径与光波长 (λ) 相当或大于光波长的微柱或微球等颗粒时, 会在离微颗粒阴影侧表面一定距离处形成最小可小于衍射极限的横向波束宽度的高强度聚焦光束^[10]。

3 光子纳米喷流的性能

图 1 为形成于球/柱微颗粒阴影侧后方的 PNJ 示意图, 通常用 4 个属性参数来表示。 I_{\max} 为最大光强度, 表示横轴方向光场分布的最大值点; d 为焦距, 为微颗粒中心到最大光强度点之间的距离; L 为衰减长度, 表示沿光传播方向 I_{\max} 点到 I_{\max}/e 处的距离 (e 为自然常数); ω 为半高宽 (FWHM), 是中心衍射旁瓣沿着纵轴方向光场分布的半高宽值。

在《PNJ 的光学》一文中, Itagi 等^[11]利用

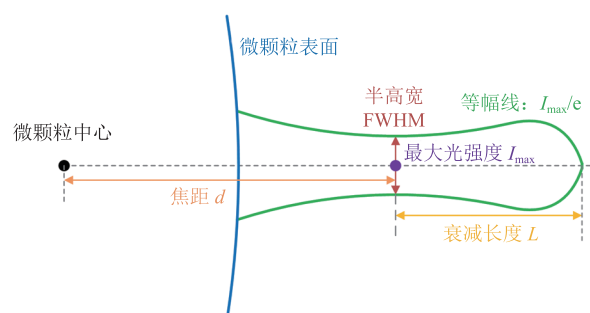


图 1 光子纳米喷流的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photonic nanojet

射线光学、Mie 散射理论和角谱分析相结合的方法，详细说明了平面波照射电介质微柱颗粒产生 PNJ 的物理机理。考虑在横向磁场模式下，平面波照射电介质微柱颗粒的 Mie 散射理论解的原理如图 2 所示。

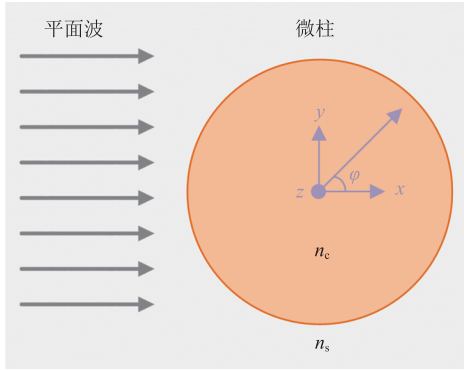


图 2 横向磁场模式下平面波照射微柱的 Mie 散射理论解

Fig. 2 Mie scattering theoretical solution of plane-wave-illuminated microcylinder in transverse magnetic mode

磁场在 x 和 y 方向上的分量为零， z 方向上的分量则满足 Helmholtz 方程：

$$\nabla^2 h + n^2 k^2 h = 0 \quad (1)$$

其中， k 为自由空间波矢量的大小， n_c 为微柱颗粒的折射率， n_s 为环境介质的折射率。假设初始入射平面波的磁场强度、微柱内的磁场强度和介质周围的散射磁场强度分别为 h_i 、 h_c 和 h_s ，如公式 (2) ~ (4) 所示，通过 Bessel 和 Hankel 函数形式，可以得到它们在极坐标下的一般解^[12]：

$$h_i(r, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} c_m \cos(m\varphi) J_m(n_s kr) \quad (2)$$

$$h_c(r, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} [a_m \cos(m\varphi) + a_m \sin(m\varphi)] J_m(n_c kr) \quad (3)$$

$$h_s(r, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} [b_m \cos(m\varphi) + b_m \sin(m\varphi)] H_m^{(1)}(n_s kr) \quad (4)$$

其中，当 $m=0$ 时，系数 $c_m=1$ ；而当 $m>0$ 时，系数 $c_m=2i^m$ ， i 为虚数单位。 J_m 为 Bessel 函数； r 为微柱颗粒的半径；下标 m 为阶数，它在原点

处的值是有限的； $H_m^{(1)}$ 为第一类 Hankel 函数，当 r 比较大时，它是一种类辐射波。根据电场和磁场的切向分量，以及它们的导数在微柱表面连续的边界条件，可以求出 a_m 和 b_m 这两个系数的值。

Itagi 等^[11]的研究表明，平面波在平板介质上的透射和反射可以通过边界的多次透射和反射来分析。对于微颗粒的散射问题，则使用将总场分解为透射场和反射场分量的 Debye 级数分析方法予以处理。据此，微柱的径向方向的模式是 Bessel 函数，离原点较远的出射柱面波和入射柱面波分别是第一类和第二类 Hankel 函数。利用 Debye 级数分析方法，根据假设和边界条件进行推导，可以得到 Mie 散射理论的解是一系列模式的有限和：

$$h_i^o = \left[c_m J_m(n_s kr) + \frac{c_m}{2} (R_{BB} - 1) H_m^{(1)}(n_s kr) \right] + \frac{c_m}{2} \sum_{j=0}^{\infty} T_{AB} (R_{AA})^j T_{BA} H_m^{(1)}(n_s kr) \quad (5)$$

其中， h_i^o 为微柱外的总磁场强度。设模式 I_c 和 O_c 分别代表入射和出射柱面波，下标 A 和 B 则分别代表位于微颗粒之中和微颗粒之外。透射模 I_{cB} 会产生透射模 I_{cA} 和反射模 O_{cB} ，利用边界条件可求出透射模 I_{cB} 的反射系数 R_{BB} 和微颗粒中的透射系数 T_{BA} 。采用相同的方式，可以得到 O_{cA} 模产生反射模 I_{cA} 和透射模 O_{cB} 时的反射系数 R_{AA} 和透射系数 T_{AB} 。在 Debye 级数分量所表示的有限和中，每一个 Debye 级数决定了反射和透射系数所对应的一个总场分量。很明显，形成于微颗粒阴影侧后方的 PNJ 主要由入射波两次折射所产生的 $T_{AB} T_{BA}$ 分量构成，其他分量与反射系数 R_{AA} 有关。

从更深层次的机理来看，光与微颗粒相互作用所涉及的绝大多数物理现象，其实都可以借助 Maxwell 方程在球形颗粒的精确解析解或者其延伸的近似解来予以描述。在 PNJ 的相关研究中，其理论解释通常采用微颗粒的 Mie 散射理论、几何光学和数值仿真分析相结合的方法。

由于 PNJ 的形状特征取决于微颗粒的材料特性和几何形貌、外部环境介质的属性, 以及照射光源等因素, 因此, PNJ 理论研究的主要一块通常是通过设置和变化这些参数, 结合不同的结构组成设计, 达到改变 PNJ 属性参数的目的。从几何形貌上来说, 产生 PNJ 的不同结构形状如图 3 所示, 包括微柱^[3]、微球^[13]、椭球体^[14]、微盘^[15]、正方形^[16]、立方体^[17]、核壳微柱^[18]、多层微颗粒^[19]、波浪形微柱^[20]、微球壳^[21]、同心环^[22]、自组装纳米光纤^[23]、复合结构的非球对称型电介质微颗粒^[24]、微圆环面^[25]和类似瓶子形微颗粒^[26-27]等。平面波作为 PNJ 研究中最广泛使用的照射光源, 其在不同条件下(如改变光的波长、振幅、偏振和对称性等)对 PNJ 形成的影响在 Kim 等^[28]和 Liu 等^[29]的工作中有过详细的研究和探讨。除了平面波外, 紧聚焦的高斯光束

也是有关 PNJ 的理论和实验研究中经常被采用的照射光源^[30-34]。对照射光源、电介质材料的折射率和尺寸形貌等参数采取不同的设计, 能够有效地调节和控制形成的 PNJ 光束。以 PNJ 的延长为例, 通过将原先单层实心的微柱或者微球设计成双层或多层微颗粒^[35-38], 可使其折射率阶跃变化。平面波照射微颗粒得到的 PNJ 在焦点附近的坡印亭矢量分布变得平坦, 从微颗粒阴影侧射出的光线, 其会聚和发散的速度变缓, 从而 PNJ 的长度被拉长。Ruiz 等^[36]设计了一种五层以上的多层结构微球, 能够产生长度约为 40 倍照射波长的 PNJ。Gu 等^[39]借鉴双层结构和液体浸没两种延长 PNJ 的方法, 综合设计了一种可浸没于液体和液体填充中空微柱结构的微颗粒, PNJ 的衰减长度能被延长至 108 倍的照射波长。Huang 等^[40]利用遗传算法结合 Mie 理论, 优化了多层微柱在自由

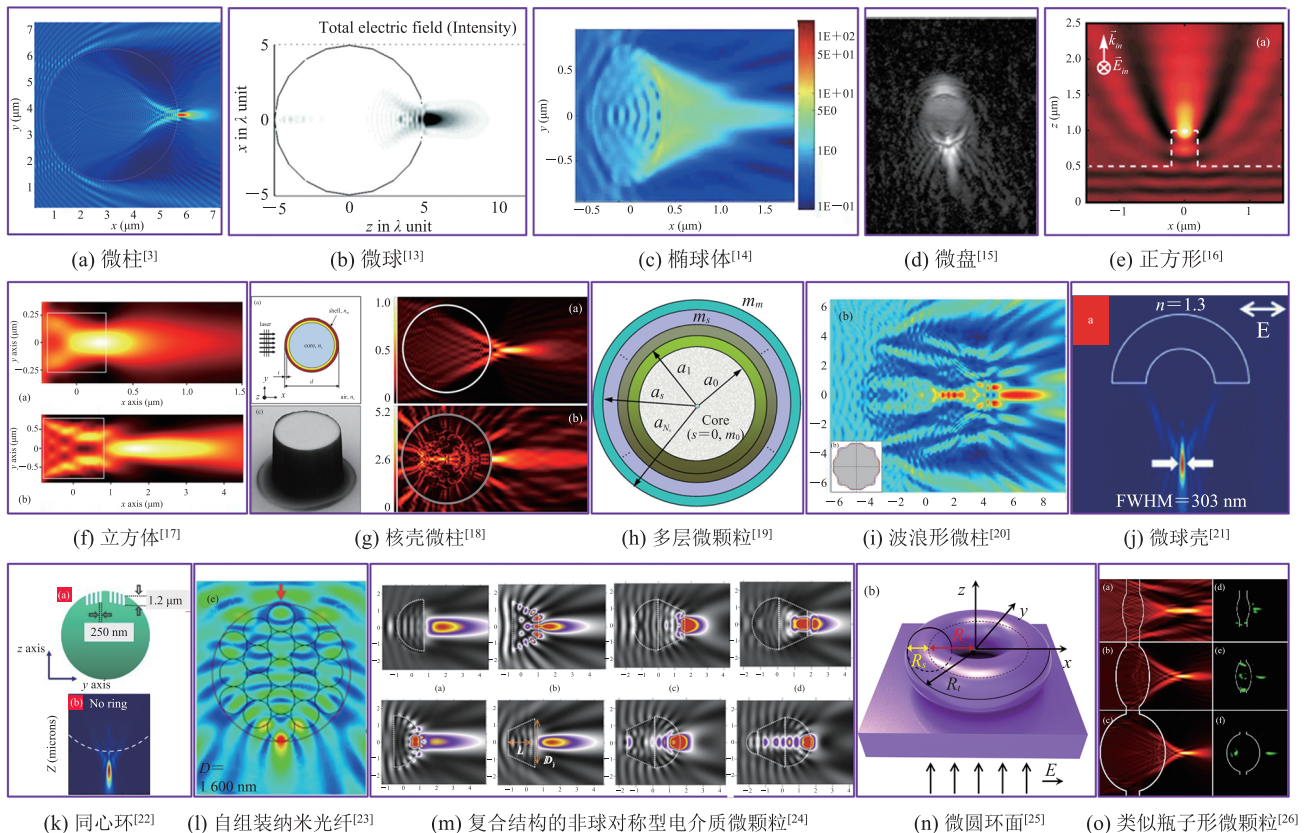


图 3 不同形状微颗粒产生的光子纳米喷流

Fig. 3 PNJs from microparticles of different shapes

空间中产生的 PNJ 的磁场强度分布, 研究结果表明, 合理设计的五层结构微柱可以产生超长 PNJ, 其光束长度为照射波长的 107.5 倍。Liu 等^[41]运用浸没的工程化半球, 在波长为 365 nm 的平面波照射下, 半径为 4.5 μm 的双层半球能产生工作距离为 9.6 μm 、半高宽为 287 nm、长度为 23.37 λ 的较长 PNJ。Zhou 等^[42]使用工程化的方法加工了包含负锥透镜结构的微球, 其在波长为 405 nm 的入射光的作用下形成超长光聚焦, 焦点远离出射表面的距离约为 52 λ , PNJ 光束长度达 120.4 λ 。Yue 等^[43]通过在光纤剖面上构建形状可控、自组装的液滴球体透镜, 可获得工作距离和衰减长度分别为 79.8 μm 和 72.2 μm 的超长 PNJ。Umar 等^[44]构造了一种类似“光子笔”的微结构, 可在平面波照射下产生极长的 PNJ, 比如, 将一定直径的球体(充当笔尖)半浸入宽度和高度分别为球体直径 5 倍的“桶状”材料中, 形成类似“圆珠笔”的微结构, 能够产生最长喷流长度为 330 λ (121.6 μm) 的极长 PNJ。

对于 PNJ 的延长来说, 目前, 人们还缺乏一个对 PNJ 延长界限的探讨, 即是否可以通过调节照射光源、电介质材料的折射率和尺寸形貌、环境介质属性等参数无限延长 PNJ? 众所周知, PNJ 的延长往往伴随着最大光强值的减小和 FWHM 的变宽, PNJ 要求其最大光强要高于照射波的强度, 那么, 这个最大光强是否有一个下限值, 需要超过照射波的强度多少才能被认定为 PNJ, 在相应的多少强度范围内是属于弱聚焦和强聚焦; FWHM 是否有一个上限值, 是否需要维持亚波长 FWHM 的部分等。这些需要对 PNJ 的延长乃至 PNJ 本身, 形成一个标准性的定义和说明, 这对推动该领域形成明确的基本理论框架和规范的研究范式十分重要。

实验中通常利用显微成像法对 PNJ 进行测量。Ferrand 等^[45]使用快速扫描共聚焦显微镜在探测模式下对 PNJ 进行直接成像, 获得原始数据

后, 通过三线插值和三维去卷积得到其在空间上的分布, 最后重构出 PNJ 光束。Kim 等^[28]利用高分辨率干涉显微镜, 在远场的像平面处测量光穿过微球后所形成的 PNJ。Wu 等^[22,46]利用普通的光学显微镜直接观察光经过物镜和微球后的光斑, 比较没有同心环、有同心环和不同同心环个数的微球产生的 PNJ 情况, 这种实验方法只能起到定性比较的作用, 无法真正实现对 PNJ 光束的测定。对于横向波束宽度小于衍射极限的 PNJ 来说, 相当于其数值孔径比通常置于空气中的干镜的最高数值孔径要高(如大于 0.9), 在实际的实验测量过程中, 如使用更小数值孔径的物镜进行测量, 则 PNJ 中较高数值孔径的分量可能会因为低数值孔径物镜的接收角过小而无法被收集到, 造成测到的 PNJ 截面的光斑尺寸小于实际值。

PNJ 的主要特性包括以下几个方面^[10]:

- (a) I_{max} 大于照射光的强度;
- (b) 在未将 PNJ 推广至光子喷流 (photonic jet) 时, 其 FWHM 的值可以小于经典的衍射极限, 目前已报到的最小值为 114.7 nm^[27];
- (c) 是一种不同于回音壁模的非谐振模式;
- (d) 可产生 PNJ 的微颗粒的直径约在 2 倍到大于 40 倍照射波长的范围;
- (e) 微颗粒与环境介质的折射率对比度一般要小于 2;
- (f) 可以沿着可延伸到电介质圆柱或微球外 2 个照射波长以上的路径, 维持亚波长半高宽的横向波束宽度;
- (g) 这种束流同时拥有传播和倏逝场分量^[47];
- (h) 其远场背向散射的衰减正比于嵌入 PNJ 的金属 NP 直径的三次方, 慢于按 NP 直径六次方衰减的 Rayleigh 散射。

4 光子纳米喷流的应用

PNJ 的独特性质使它在许多领域都有重要的

应用, 如光信号增强^[48-52]、微纳加工与制造^[53-56]、超分辨光学成像^[57-60]、NP/细胞的捕获/操纵和探测^[61-64]、光力^[65]、光数据存储^[66]、高空间分辨率传感器^[67]、耦合谐振腔光波导^[68]、定向发射^[69]、扫描探针^[70]、全光开关^[71-72]、表面等离子激元^[73]、Bloch 表面波^[74]、光流体微腔^[75]、微粒的背向力^[76]、激光烧蚀中的冲击波探测^[77]、光遗传学^[78]和半导体器件无损检测^[79]等。下面 4 个小节将对前面列出的 4 种主要应用进行详细介绍。

4.1 增强背向散射、荧光、拉曼散射和透射信号

PNJ 的高强度聚焦和较窄波束宽度特性使它能够增强嵌入纳米喷流中的 NP 引起的背向散射信号、荧光分子的荧光信号、被探测报告分子的拉曼散射信号和近场探针的透射信号等。Li 等^[48]通过精确的数值仿真发现, 平面波照射的电介质微球产生的三维 PNJ 能使嵌入 PNJ 中的 NP 的背向散射增强因子高达 8 个数量级。图 4 展示了一个直径 20 nm 的金 NP 通过 PNJ 时对背向散射信号的扰动。当金 NP 穿过 PNJ 的中心时, 归一化的背向散射强度扰动达 40%。

PNJ 的高强度会聚能力能驱动增强光非线性效应。例如, 悬浮于染料溶液之上的二氧化硅微珠对双光子激发的荧光有超过 30% 的增强, 同

时不影响荧光发光效率^[49]。暨南大学李宝军教授的课题组使用光纤探针捕获自然的活酵母或人正常细胞, 制成可操纵的生物微透镜, 将激发光会聚到亚波长区域, 增强 $\text{NaYF}_4:\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 核壳 NP 的上转换荧光, 其增强因子高达 2 个数量级^[50]。这种基于 PNJ 效应的上转换荧光增强技术可以用来实现暗场下的单细胞成像和探测荧光标记的病原菌。图 5 是利用该技术进行荧光成像和探测单个大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的实验结果。对比有和没有生物微透镜的情况可以看出, 生物微透镜的出现明显增强了大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的上转换荧光。新加坡国立大学刘小刚教授的课题组通过 PEGDA 聚合物微珠的超透镜聚焦效应调制激发场和发射场的波前, 能够使镧系掺杂纳米晶中的光子上转换过程实现高达 5 个数量级的发光放大; 该研究设计提供了一种将低功率入射光汇聚成高场强光子热点的一般策略, 使得高发散发射场准直并聚集到远场成为可能, 同时证明了介电微珠的超透镜性质适合在亚阈值光强度下增强上转换 NP 中的光子-光子相互作用^[80]。Biccarri 等^[81]利用介电微球提高量子点发光的耦合效率, 在量子点发光提取和方向性方面能够增强收集效率, 使用低数值孔径物镜和置于

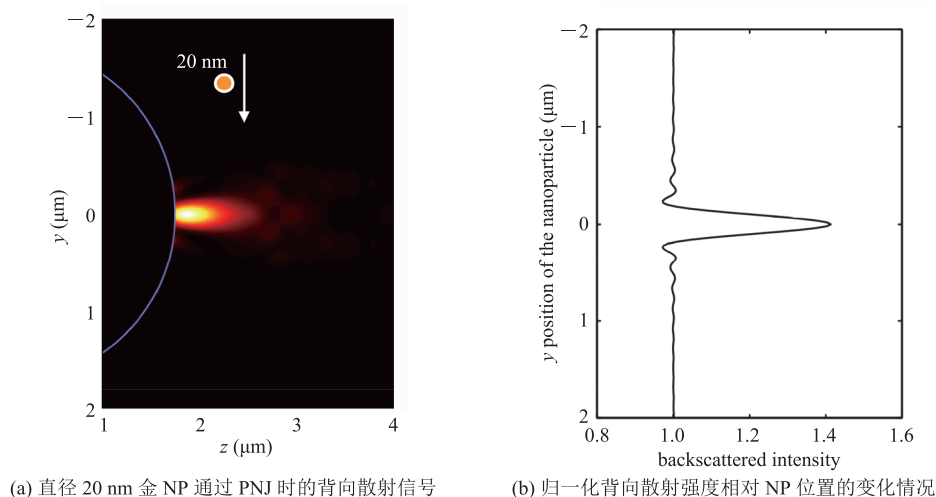


图 4 金 NP 通过 PNJ 时所引起的强扰动效应^[48]

Fig. 4 Strong perturbation effect caused by gold NP moving through a PNJ^[48]

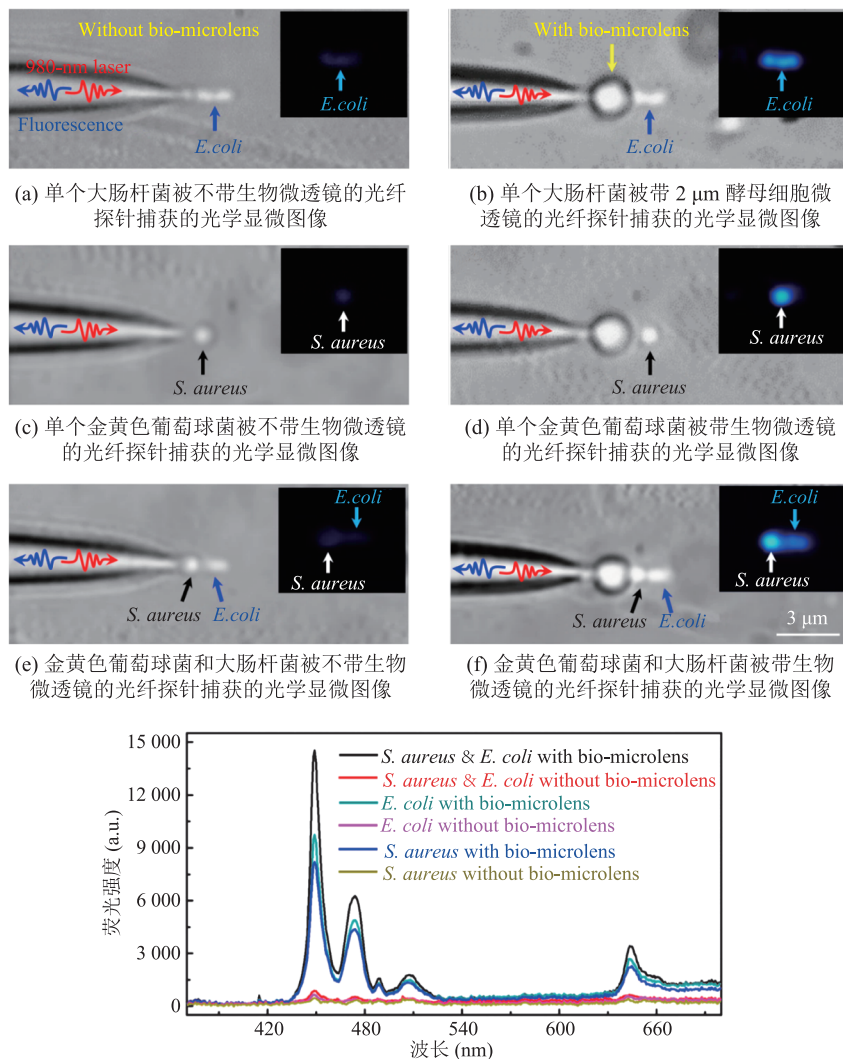


图 5 生物微透镜增强单个大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的上转换荧光^[50]

Fig. 5 Upconversion fluorescence enhancement of single *E. coli* and *S. aureus* with a bio-microlens^[50]

电子点顶部的介电微球，可将收集的辐射能量增加约 42 倍。

当将二氧化硅微球覆盖到硅衬底上时，微球后表面所形成的紧聚焦局域电磁场，也就是 PNJ，能够使硅衬底的拉曼散射信号得到增强^[51]。图 6 是典型的集成了拉曼显微镜和微球来增强探测样品拉曼散射信号的实验装置图，硅上方的聚苯乙烯微球能大幅度提高硅拉曼散射峰的强度^[82]。与常规的表面增强拉曼散射相比，由于样品制备简单、微球的位置和尺寸更容易精确控制，因

此，微球增强拉曼散射光谱可能更具优势。通过将贵金属纳米结构的等离子体共振（如纳米蘑菇银覆盖的纳米柱^[83]、金属膜覆盖的单层纳米颗粒^[84]）和微球 PNJ 结合，可在表面增强拉曼散射的基础上进一步增强被测报告分子的拉曼散射光谱信号，实现对待测物质更高灵敏度和更低检测限的探测。

电介质微球对光的亚波长限制可使集成有微球的悬臂梁中空探针的透射能力增加一个数量级^[52]。图 7 给出了中空探针有微球和没有微球

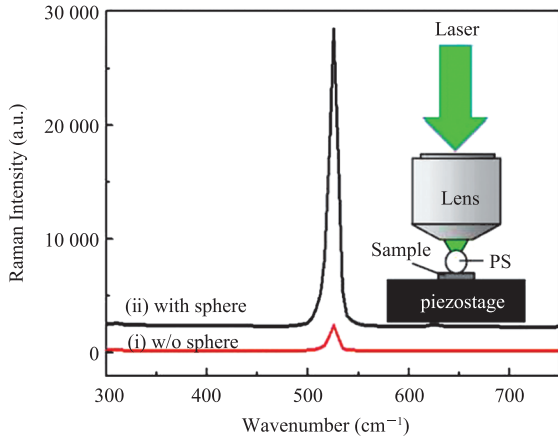


图 6 典型的微球增强样品拉曼散射的光谱图^[82]

Fig. 6 Typical Raman scattering spectra enhanced by a microsphere^[82]

时, 近场光学纳米显微镜对银纳米线的透射成像。可以看出, 当有微球时, 透过率增强, 银纳米线的成像对比度增强。

4.2 微纳加工与制造

利用微颗粒产生的高强度、窄束腰的聚焦光进行微纳加工与制造, 是 PNJ 效应的一个重要应用分支。McLeod 等^[53]最早报道了使用光捕获的微球作为透镜, 在聚酰亚胺膜上近场直写亚波长的复杂纳米图案。532 nm 的连续激光产生的贝塞尔光束用来捕获和操纵微球, 355 nm 的脉冲高斯光束照射到被捕获的微球后产生 PNJ, 并对衬底膜进行加工, 图 8 是它的实验装置图和模型图。利用这种方式, 尺寸小至 100 nm 的任意图案和

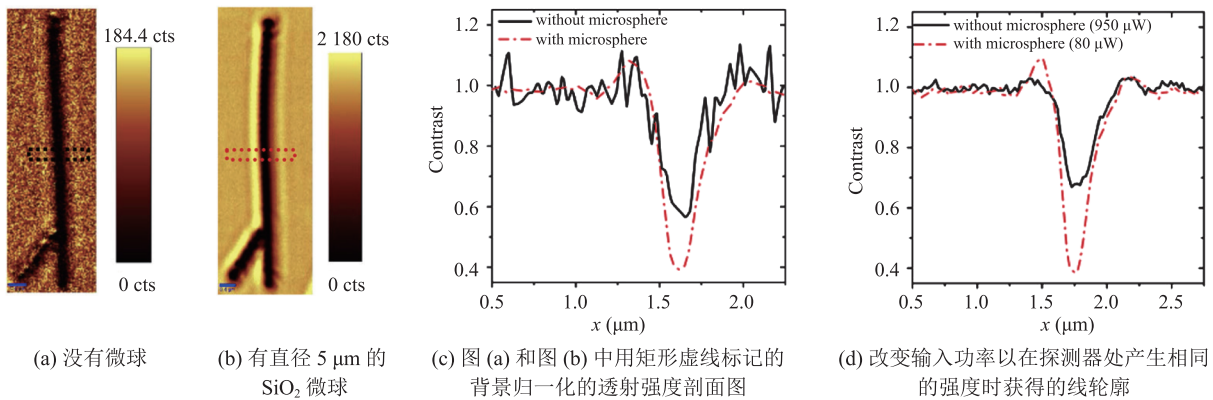
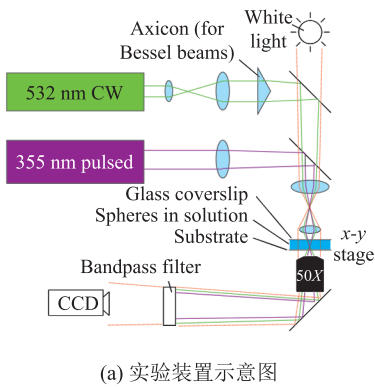
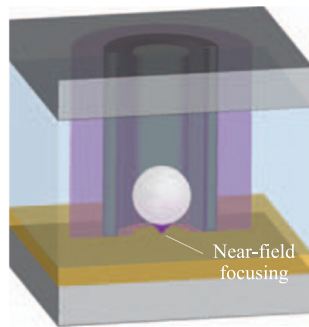


图 7 没有微球和有直径 5 μm 的 SiO₂ 微球时对银纳米线的近场光学透射成像^[52]

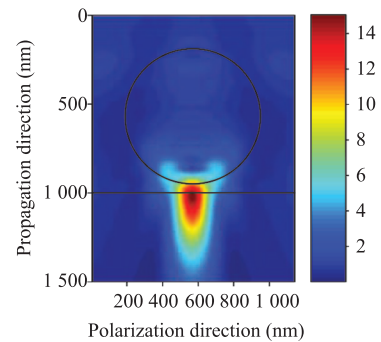
Fig. 7 Near-field optical transmission image of Ag nanowires acquired without and with a microsphere (silica, 5 μm)^[52]



(a) 实验装置示意图



(b) 在捕获激光束中被捕获在聚酰亚胺表面附近的白色微球



(c) 通过时域有限差分方法, 计算得到的光在聚酰亚胺衬底上方的水中穿过直径 0.76 μm 聚苯乙烯微球时产生的光强分布情况

图 8 利用光捕获的微球进行亚波长直写纳米图案^[53]

Fig. 8 Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres^[53]

特征形状都能被加工出来。

光照射微球产生的 PNJ 可以对衬底进行光刻，并以尺寸和形状可控的方式制备等离子体纳米盘^[54]。基于 PNJ 的微球光刻技术是低成本、大面积制备近红外超表面的多用途工具^[55]。图 9 是利用这种技术进行超表面图案制造的一般过程，微球通过自组装的方法平铺在光刻胶膜上，形成一种密排六方晶格形状。分别用不同角度入射的紫外光对微球进行照射，经过显影和转移，最终制备出形状不同的近红外超表面。把高折射率微球和传统平凸透镜构成的全介质透镜与飞秒激光结合，可在各种衬底上直接刻写任意图案和纳米结构^[85]。

PNJ 的这种高精度纳米结构化表面的能力不仅给纳米技术在纳米光子学或者纳米电子学等传统领域的巩固打开了大门，还为生物医学等较少探索的领域开辟了新的机会。如无标记生物传感器、基于场效应的晶体管生物传感器、便携式诊断系统、可穿戴传感器，以及药物递送结构和微纳米流体器件等的纳米制造。

4.3 超分辨光学成像

PNJ 在超分辨光学成像方面的应用主要是将其作为解释微颗粒透镜超分辨成像的机理。2011 年，英国曼切斯特大学的 Wang 等^[57]首次提出了一种基于微球透镜的纳米显微技术，在标准的白炽光源下，能对各种纳米尺度的物体实现高分辨

率和非标记的成像。图 10 为白光微球纳米显微镜的实验结构图，将直径几个微米的微球直接放置在样品上，通过显微镜可以观察到低于衍射极限尺寸的样品的像。微球纳米显微镜超分辨成像的机理目前使用最多的是 PNJ 为主、射线光学为辅的理论，即超分辨能力用 PNJ 低于衍射极限值的横向波束宽度来解释，而形成于样品下方的虚像则采用经典的几何光学模型来说明。目前，白光照射下的微球纳米显微镜的最高分辨率可达 50 nm。这种纳米显微技术具有简单、低成本、实时观测和易于集成的特点，在病毒^[86]、亚细胞器和生物分子^[87]、半导体芯片^[88]和子表面纳米结构

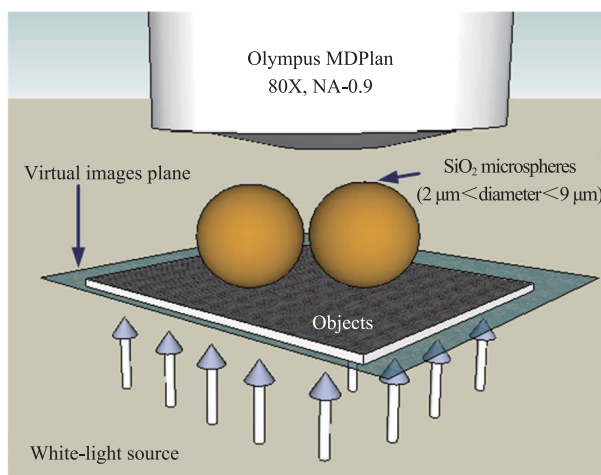
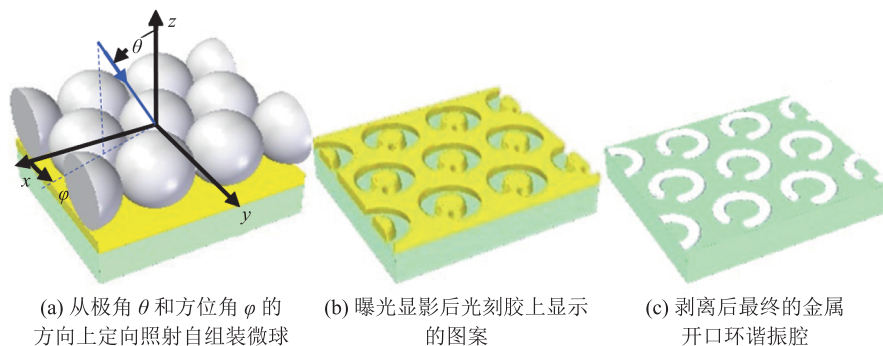


图 10 白光微球纳米显微镜的实验结构图^[57]

Fig. 10 Experimental structure diagram of white-light microsphere nanoscopy^[57]



(a) 从极角 θ 和方位角 φ 的方向上定向照射自组装微球 (b) 曝光显影后光刻胶上显示的图案 (c) 剥离后最终的金属开口环谐振腔

图 9 微球光刻制作红外超表面的过程图^[55]

Fig. 9 Illustration of fabrication procedure for infrared metasurface made by microsphere photolithography^[55]

结构^[89-90]等的成像应用方面具有显著优势。

Krivitsky 等^[58]在默认 PNJ 为微球纳米显微镜超分辨成像机理的前提下, 使用精细的微量吸移管将微球固定住, 通过移动和定位微球在样品上的不同位置, 来实现对样品的扫描成像。图 11 是吸附在微量吸移管(玻璃材质)上的微球实现运动控制和扫描成像的总体设计图。通过三维平移台可以将微球移动到不同的位置, 并对每个位置的样品进行成像。它的实现有助于推动微球纳米显微镜的实用化, 也便于对移动的物体进行追踪成像, 在样品检测、微制造和生物成像等方面具有潜在应用价值。

在把 PNJ 作为微球纳米显微镜可实现超分辨光学成像的原因方面, 瑞士联邦理工学院微系统实验室的研究人员延续了这一解释^[59]。图 12 是该小组说明 PNJ 产生和用 PNJ 来解释微球纳米显微镜超分辨成像机理的原理路线图。他们用 PNJ 的 FWHM 来表征微球纳米显微镜的理论放大率, 然后用像的实验放大率和点扩展函数对系统的分辨率进行估算, 得出微球纳米显微镜与 PNJ 直接相关的结论。只是在研究当中, 所使用

的样品尺寸接近或者大于 PNJ 的最小波束宽度, 而真正需要释疑的更小尺寸的超分辨成像却没有论及。

在超分辨成像领域, PNJ 比较特别的应用是利用自然生成的超透镜——蜘蛛丝, 实现了对低于衍射极限样品结构的超分辨成像^[60]。图 13 是 *Nephila edulis* 蜘蛛丝和蜘蛛丝用作生物超透镜进行超分辨光学成像的示意图。蜘蛛丝直接放在待成像的样品表面上, 并用胶带固定住, 蜘蛛丝和样品之间的空隙用异丙醇进行填充, 以提高成像对比度。柱状的蜘蛛丝对入射光具有强聚焦能力, 其亚衍射极限的 FWHM 可以实现对低于 100 nm 尺寸样品的超分辨成像。与常用的光纤、二氧化硅或聚合物等微柱或微球超透镜相比, 蜘蛛丝不需要复杂的工艺制备过程, 而且这种自然的超透镜更容易与生物系统进行兼容和集成。

有关高折射率微球纳米显微镜的实验结果(在空气中, 因焦点形成于球内, 无法获得超分辨的像; 而浸没在液体或弹性体中时, 折射率对比下降, 焦点移到颗粒表面外, 获得超分辨的像^[91])似乎给这一理论提供了很好的证据, 只

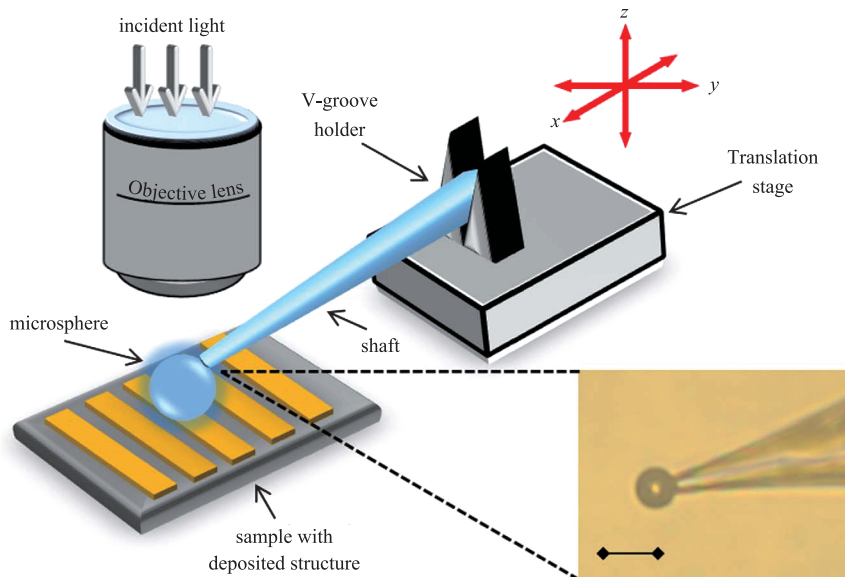


图 11 吸附在微量吸移管上的微球进行扫描成像的布局图^[58]

Fig. 11 Layout of scanning imaging of microsphere attached on micropipette^[58]

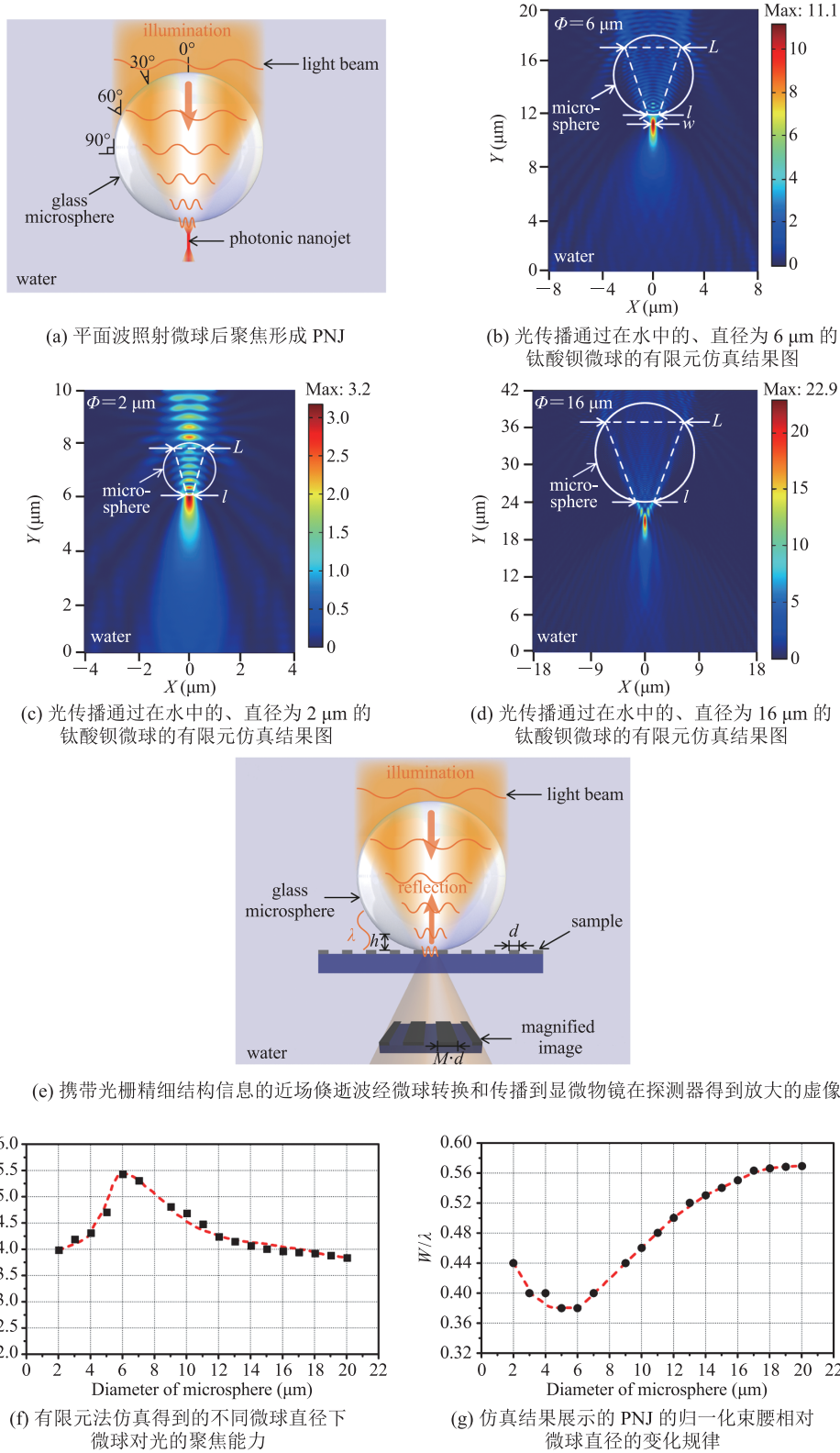
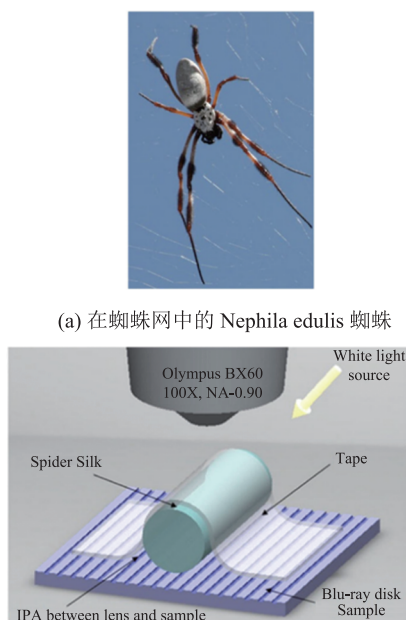


图 12 PNJ 产生和电介质微球超分辨光学成像的机理^[59]

Fig. 12 PNJ generation and mechanism of super-resolution optical imaging for dielectric microspheres^[59]

(a) 在蜘蛛网中的 *Nephila edulis* 蜘蛛

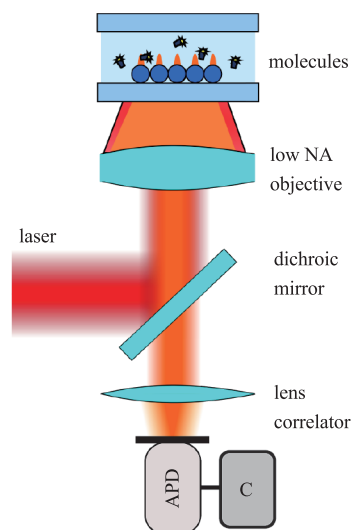
(b) 反射模式下蜘蛛丝生物超透镜的成像原理图

图 13 *Nephila edulis* 蜘蛛丝和蜘蛛丝用于超分辨光学成像^[60]Fig. 13 *Nephila edulis* spider silk and spider silk for super-resolution optical imaging^[60]

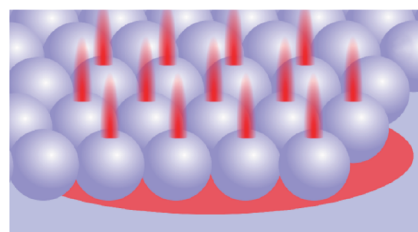
不过理论所能达到的最小横向波束宽度 ($\lambda/3$, $\lambda = 400 \text{ nm}$ ^[48]) 和实验所能测到的高分辨能力 (50 nm ^[57], 25 nm ^[92]) 始终是一对无法调和的矛盾。

4.4 捕获/操纵和探测纳米颗粒、细胞和生物分子

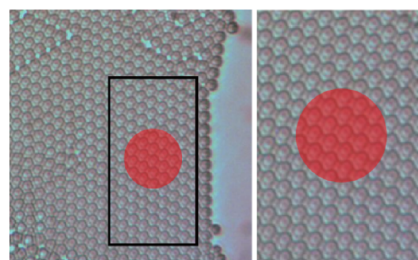
作为高聚焦传播光束的 PNJ, 其波束的横向尺寸通常在亚波长和亚衍射极限量级, 长度通常有几个波长。这种光束对于放置于其中的微小物体 (如 NP、细胞和生物分子等) 来说, 能增强相应的背向散射和荧光等信号。同时, PNJ 光束所产生的光梯度力能够捕获这类微小物体^[65]。利用这些特性, PNJ 可以很好地实现对微小物体, 特别是尺寸比波长小很多的纳米尺度物体的操纵和探测。2014 年, Ghenuche 等^[61]利用自组装的二维微球产生的 PNJ 阵列实现了浓度约 10 pmol/L 的荧光分子的多焦点并行探测。图 14 是微球产生的 PNJ 阵列多焦点并行探测荧光分子的原理和实验图。光经过显微物镜照射到几十个微球上, 产生 PNJ 阵列, 激发荧光分子, 同时通过微球收集荧光, 再通过荧光相关光谱仪测试收集到的信



(a) 荧光相关光谱的实验装置原理图

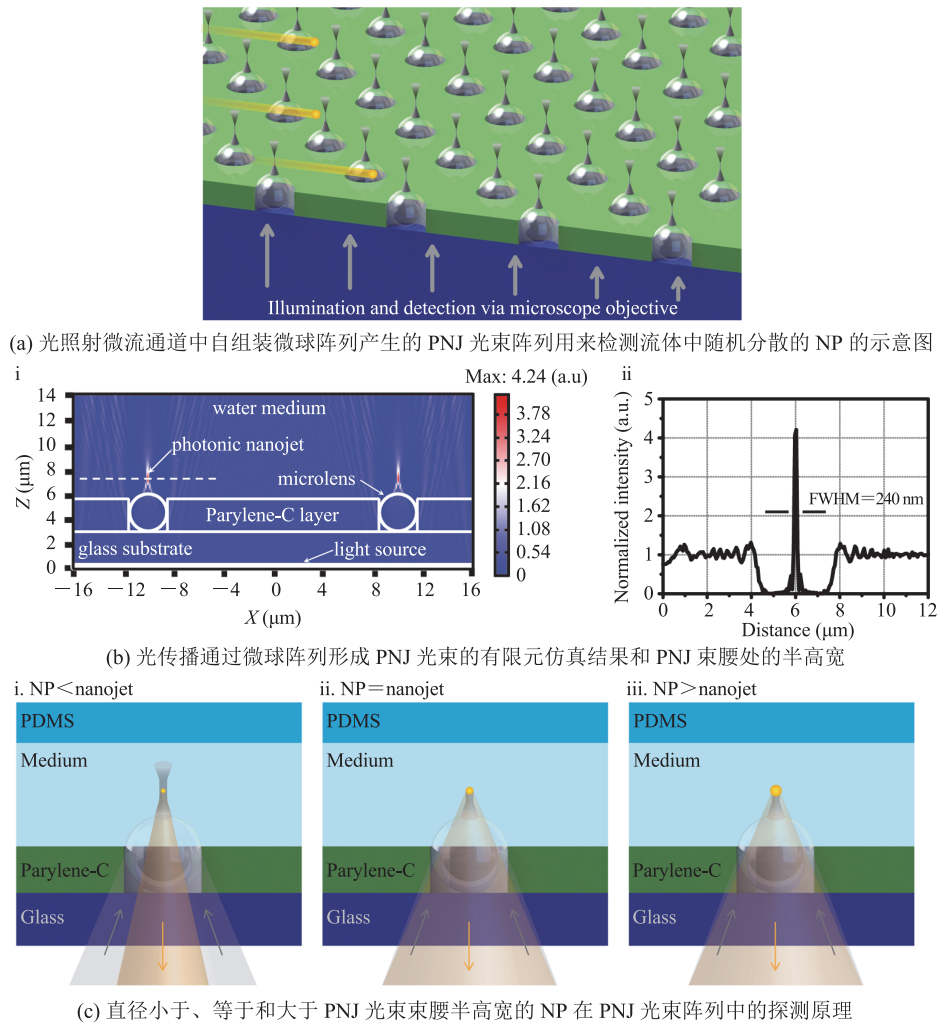


(b) 并行多焦点探测方案示意图

(c) 直径为 $2 \mu\text{m}$ 微球阵列的显微图像和放大图 (红色圆圈为激光照射区域)图 14 PNJ 阵列多焦点并行探测荧光分子^[61]Fig. 14 Multi-focus parallel detection of fluorescent molecules with PNJ arrays^[61]

号, 实现对荧光分子的探测。

Yang 等^[62]将微球嵌入到微孔阵列模板得到微球阵列, 并置于水环境中, 微球聚焦从显微物镜照射出来的光, 形成 PNJ 阵列, 当一个 NP 随机地通过 PNJ 时, NP 的背向散射光/荧光发射能被视频显微镜即刻探测到。图 15 是 PNJ 阵列快速探测流体中单个 NP 的示意图, 在玻璃衬底上的 Parylene-C 模板中, 微球阵列通过自组装形

图 15 PNJ 阵列在流体中快速探测单个 NP 的示意图^[62]Fig. 15 Schematic diagram of PNJ array for rapid detection of single NP in fluid^[62]

成，位于微球下方的显微物镜照射微球，并探测散射回来的信号。当 NP 的直径 $<$ PNJ 的 FWHM 时，照射微球的部分光被散射回来；当 NP 的直径 \geq PNJ 的 FWHM 时，经微球聚焦的光都被背向散射回来。研究发现，直径小至 50 nm 的金 NP 和直径小至 20 nm 的荧光 NP 分别在显微镜的明场和荧光模式下可以观察到。与存在于 PNJ 外面的 NP 相比，背向散射光/荧光的增强因子大约为 40。这种可放置于微流环境中的 PNJ 阵列探测技术能用来免疫检测固定在金 NP 上的生物分子。

Li 等^[63]利用光泳自组装技术将微球分散到透明光滑的光纤端面，照射光经光纤到达微球透

镜阵列，在微球阴影侧表面形成 PNJ 阵列，捕获 NP 和亚波长细胞。这些纳米物体产生的背向散射信号经微球传回光纤探针，并最终被光电探测器检测到。PNJ 阵列可实时探测单个 NP，增强因子达到 $10^3 \sim 10^4$ 。图 16 给出了并行 PNJ 阵列捕获和探测 NP 及细胞的示意图。此外，由于 PNJ 对不同尺寸的 NP 具有不同的光梯度力和散射力，因此，可以选择性地捕获混合液中特定尺寸的 NP 或细胞。

PNJ 强的光限制和信号增强特性给操纵和探测单个亚 100 nm 的 NP 提供了可能。Li 等^[64]把单个微球透镜固定到一根光纤探针上，其产生

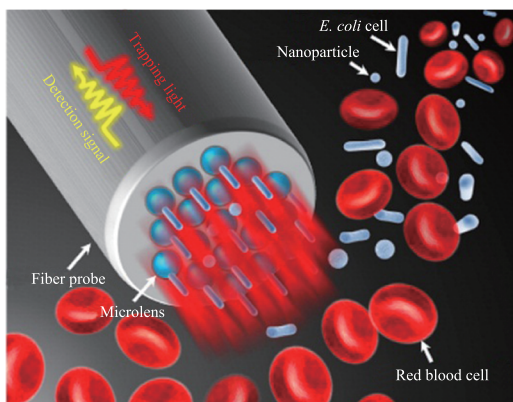


图 16 并行 PNJ 阵列捕获和探测 NP 及细胞的示意图^[63]

Fig. 16 Schematic illustration of a parallel PNJ array capturing and detecting NP and cells^[63]

的 PNJ 能够操纵尺寸为 85 nm 的单个荧光聚苯乙烯 NP 和质粒 DNA 分子等。单个 NP 和生物分子的探测是通过测量背向散射信号和荧光信号实现的。图 17 是使用 PNJ 操纵和探测单个 NP 的实验结果图。探针-微透镜结构能够被稳定地保持和移动, 从而保证后续对 NP 和生物分子的操纵。通过给光纤加载激光信号, 单个 85 nm 的荧光聚苯乙烯 NP 可以被 PNJ 捕获, NP 引起的背向散射光或荧光增强可以实时地被光电探测器探测到。Lu 等^[93]利用光捕获的微球产生的 PNJ, 在 20~90 °C 的液态水温度范围内, 捕获和操纵单个上转换 NP。PNJ 的使用具有 3 个优势: (1) 更大的光力使得操纵更容易; (2) 增加的局部激光密度使得被捕获上转换 NP 的多光子激发发光显著增强; (3) PNJ 提高了捕获 NP 的热稳定性。研究表明, 与传统的光学捕获方法相比, 该方法获得的有效捕获光阱刚度增加了 7 倍。

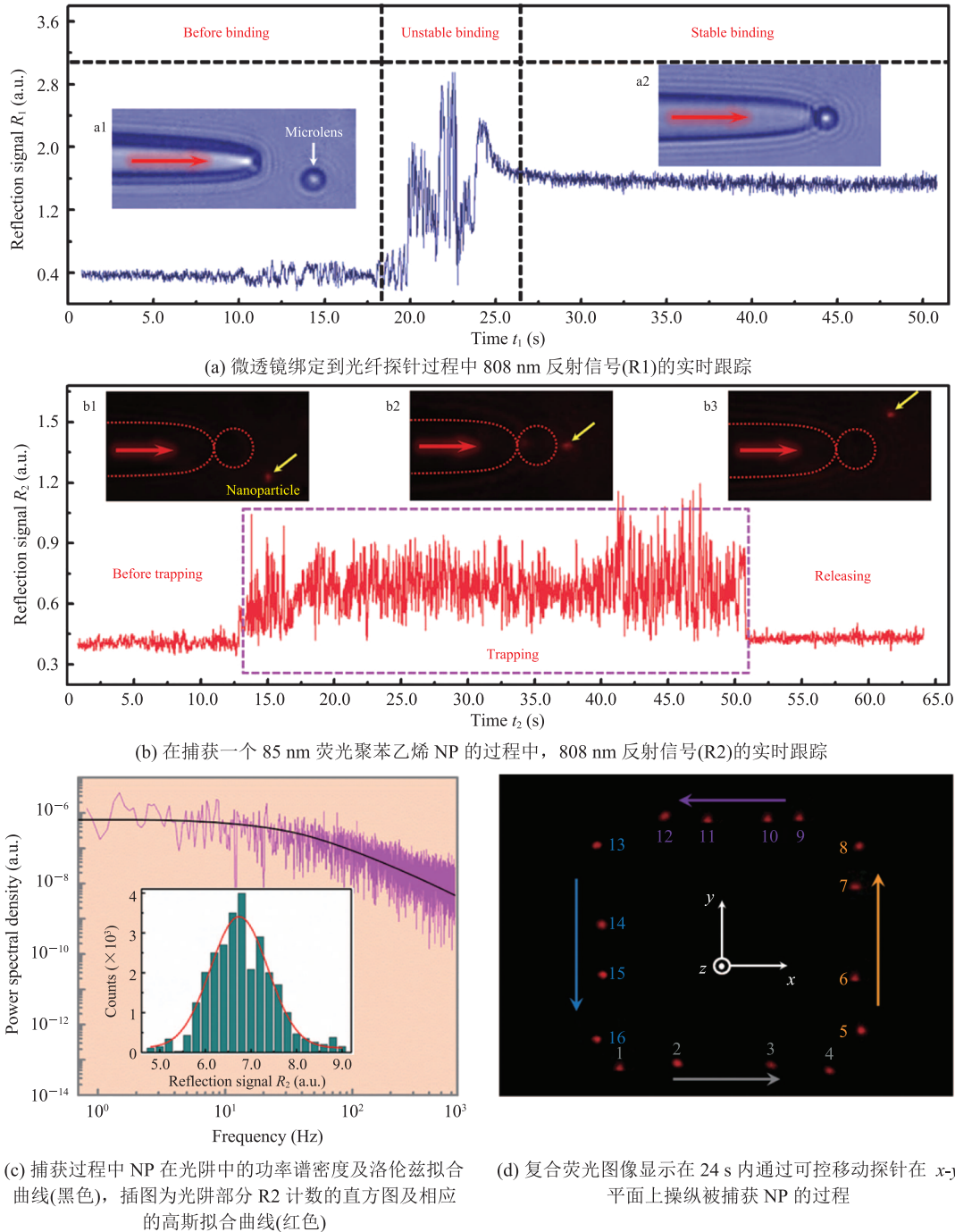
针对常用的基于 PNJ 的单纳米颗粒探测方法存在只能间接测量背向散射信号、实验装置复杂和只能用光强度一个参数反映等不足, Gu 等^[94]提出和设计了一种将液体填充中空微柱用作微流通道, 直接利用 PNJ 本身的变化来探测通道内单纳米颗粒的方法, 图 18 为利用液体填充中空微柱产生 PNJ 来探测单 NP 的原理图。这种方法

由于直接利用 PNJ 本身属性参数的变化来对纳米颗粒进行响应, 因此, 实验测量时的装置就变得更加简单; 同时, 由于能利用 PNJ 的多个属性参数, 因此, 这种方法具有反映更多信息的可能, 从而扩展了 PNJ 探测单纳米颗粒的能力。通过纳米颗粒的引入所引起的 PNJ 场等高线的变化, 能够探测数个纳米直径的单纳米颗粒。这一研究结果为开发基于 PNJ, 且具有低成本、高效率、多参数表达、设计简单、控制容易和可应用于微流体环境的单纳米颗粒探测方法提供了新的途径。

进一步地, 暨南大学李宝军教授和李宇超副教授所在的课题组还开发了单细胞生物放大器^[95]、活的纳米光学探针^[96]、细胞内脂滴微透镜^[97]等生物微透镜, 这些微小器件兼具捕获/操控和成像的功能, 并且具有很好的非侵入性和生物相容性。

5 总结和展望

光与中尺度微颗粒透镜相互作用, 会形成一种叫作 PNJ 的超聚焦光场, 该光场具有大于照射光的强度、最小能够小于衍射极限的 FWHM、传播至非倏逝场区域和较强的背向散射等优异性能。PNJ 的形成特征和属性参数由所研究微颗粒的电介质材料特性、几何尺寸与形貌、周围环境的性质, 以及照射光的波长尺度、光偏振性质和光束轮廓等因素决定。单纯对 PNJ 性质的研究主要是研究这些决定因素的变化对 PNJ 的性质和特征所产生的影响。其中中心思想是通过对电介质材料的折射率和形貌等几个主要参数的设置, 解决 PNJ 在微颗粒阴影侧后表面快速会聚后紧跟着快速发散的问题。也就是说, 从出射面射出的光线, 如果其出射点的分布区域越宽、出射光线越平坦, 那么, 光束聚焦和发散的速度就会越慢, 形成的 PNJ 就具有更远的焦距 d 、更长的衰减长度 L 、更小的最大光强度 I_{\max} 和更大的半高宽 ω ;

图 17 利用 PNJ 操纵和探测单个 NP^[64]Fig. 17 Manipulation and detection of individual NP using PNJ^[64]

反之, 则 d 更近、 L 更短、 I_{\max} 更大、 ω 更小。

PNJ 研究的目标可归纳为 4 个字: “细” “长” “亮” “调”。“细”指束腰宽度要细, 束腰宽度越细小, 则成像应用中的空间分辨率越

高, 微纳制造中的加工精度越高; “长”指焦距和衰减长度要长, PNJ 光束越修长, 则在光探测纳米结构、散射物体的非均匀性和远场光学等方面的应用研究中, PNJ 光束能到达更深的层次和

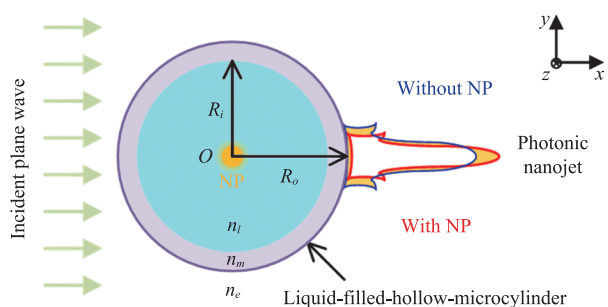


图 18 利用 PNJ 探测液体填充中空微柱内的单个 NP^[94]

Fig. 18 Detection of a single NP within a liquid-filled hollow microcylinder using PNJ^[94]

具有更高的灵活度;“亮”指最大光强度点要亮,最大光强度点越亮,则限域光场增效和与物质之间的相互作用强度越强,在背向散射、荧光、拉曼散射、非线性光信号的增强和在金属/电介质纳米颗粒、病毒、细胞片段、生物/化学分子的传感检测等方面的作用越大;“调”指 PNJ 的属性参数可调,通过对微颗粒透镜的介电属性和形貌特性、照射光源的性质、环境介质等进行调节和控制,让形成的 PNJ 在长短、形貌、分布等方面做出满足预期的变化和响应,使 PNJ 在实际的应用场景中具有更大的灵活性、更宽的适用性和更多的可能性。这里需要说明的是,通过“调”的方式来使 PNJ 变得“细”“长”或者“亮”,通常是一个 trade-off 的选择,当需要 PNJ 变得“细”“亮”时,则可能意味着它的焦距和衰减长度将变得不“长”;而当需要一个“长”的 PNJ 时,则它的焦距和衰减长度值是大的,但这往往会造成最大光强的“亮”度下降,横向波束的束腰则变得不再那么“细”。

利用 PNJ 的优异特性来不断探索和开拓新的应用,是 PNJ 领域持续发展的一条主线之一。PNJ 中高度会聚的光与物质之间的相互作用有助于更深入地认识微小颗粒对光的散射特性。PNJ 在诸如全光开关、超快激光加工等非线性光学领域的应用扩展是 PNJ 发展的一个重要趋势。多种 PNJ 特性的结合使多功能器件的开发成为可能。

此外,PNJ 领域在近几年延伸出一个比较活跃的子领域,叫弯曲的 PNJ,又称光子弯钩。光子弯钩是光在照射透明的介电微球或微圆柱体时,通过在结构、材料构成和照射光源等方面引入不对称性来形成的。光子弯钩除继承了 PNJ 的高光会聚强度、亚波长乃至亚衍射极限的半高宽、一定距离上的无衍射传播、数个波长的焦距,以及数十波长量级的衰减长度等优异性能外,还具有自弯曲和传播轨迹曲率可调等性质,这为利用 PNJ 沿弯曲轨迹操纵纳米颗粒绕过障碍物提供了可能,拓宽了 PNJ 的应用场景和范围。推动弯曲 PNJ 向捕获和操纵生物对象、亚波长倾斜照射成像、批量操控微小物体、细胞再分布、光控开关、集成光学等领域的应用和发展,是未来 PNJ 领域发展的一个重要走向。

传统 PNJ 的产生是通过透射模式实现的,即光照射并传播穿过电介质微颗粒透镜,在微颗粒透镜的后表面由入射波和折射波干涉而形成。通过引入反射界面,让反射波和入射波相互干涉,以形成聚焦光束,这是 PNJ 形成的一种新的模式方法,即反射模式,其形成的 PNJ 位于微颗粒透镜后表面界面之前的部分。这种方式形成的 PNJ 有望通过集成到“芯片实验室”、光流体通道等器件平台,实现纳米物体的分选和排列,以及应用于微颗粒透镜顶端样品的超分辨成像等。

参 考 文 献

- [1] Mosbacher M, Münzer HJ, Zimmermann J, et al. Optical field enhancement effects in laser-assisted particle removal [J]. *Applied Physics A*, 2001, 72(1): 41-44.
- [2] Luk'yanchuk BS. *Laser cleaning* [M]. Sydney: World Scientific, 2002.
- [3] Chen ZG, Taflove A, Backman V. Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique [J]. *Optics Express*,

- 2004, 12(7): 1214-1220.
- [4] Luk'yanchuk BS, Paniagua-Dominguez R, Minin I, et al. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(6): 1820-1847.
- [5] Kwan A, Dudley J, Lantz E. Who really discovered Snell's law? [J]. *Physics World*, 2002, 15(4): 64.
- [6] Luk'yanchuk BS, Arnold N, Huang SM, et al. Three-dimensional effects in dry laser cleaning [J]. *Applied Physics A*, 2003, 77(2): 209-215.
- [7] Strutt JW. On the light from the sky, its polarization and colour [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1871, 41(273): 274-279.
- [8] Bohren CF, Huffman DR. Absorption and scattering of light by small particles [M]. Mörlenbach: John Wiley & Sons, 2008.
- [9] Luk'yanchuk BS, Zheng YW, Lu YF. Laser cleaning of solid surface: optical resonance and near-field effects [C] // *Proceedings of the High-Power Laser Ablation III*, 2000: 576-587.
- [10] Heifetz A, Kong SC, Sahakian AV, et al. Photonic nanojets [J]. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2009, 6(9): 1979-1992.
- [11] Itagi AV, Challener WA. Optics of photonic nanojets [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(12): 2847-2858.
- [12] Stratton JA. *Electromagnetic theory* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [13] Lecler S, Takakura Y, Meyrueis P. Properties of a three-dimensional photonic jet [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2641-2643.
- [14] Kattawar GW, Li CH, Zhai PW, et al. Electric and magnetic energy density distributions inside and outside dielectric particles illuminated by a plane electromagnetic wave [J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4554-4559.
- [15] McCloskey D, Wang JJ, Donegan JF. Low divergence photonic nanojets from Si₃N₄ microdisks [J]. *Optics Express*, 2012, 20(1): 128-140.
- [16] Kotlyar VV, Stafeev SS, Feldman A. Photonic nanojets generated using square-profile microsteps [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5322-5329.
- [17] Liu CY. Photonic jets produced by dielectric micro cuboids [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8694-8699.
- [18] Liu CY, Hsiao KL. Direct imaging of optimal photonic nanojets from core-shell microcylinders [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5303-5306.
- [19] Geints YE, Panina EK, Zemlyanov AA. Control over parameters of photonic nanojets of dielectric microspheres [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(23): 4775-4781.
- [20] Cui ZJ, Liu DA, Sun MZ, et al. Compensation method for temperature-induced phase mismatch during frequency conversion in high-power laser systems [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(4): 525-534.
- [21] Zhu HY, Chen ZC, Chong TC, et al. Photonic jet with ultralong working distance by hemispheric shell [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6626-6633.
- [22] Wu MX, Huang BJ, Chen R, et al. Modulation of photonic nanojets generated by microspheres decorated with concentric rings [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 20096-20103.
- [23] Yue LY, Yan B, Wang ZB. Photonic nanojet of cylindrical metalens assembled by hexagonally arranged nanofibers for breaking the diffraction limit [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1336-1339.
- [24] Geints YE, Zemlyanov AA, Panina EK. Photonic nanojets as a versatile optical tool for wave super-localization [C] // *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1760(1): 020016.
- [25] Zhang BF, Hao JJ, Shen Z, et al. Ultralong photonic nanojet formed by dielectric microtoroid structure [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8331-8337.
- [26] Lin CB, Huang ZH, Liu CY. Formation of high-quality photonic nanojets by decorating spider silk [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 667-670.
- [27] Gu GQ, Song J, Liang HD, et al. Overstepping the upper refractive index limit to form ultra-narrow

- photonic nanojets [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5635.
- [28] Kim MS, Scharf T, Mühlig S, et al. Engineering photonic nanojets [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10206-10220.
- [29] Liu Y, Wang BY, Ding ZH. Influence of incident light polarization on photonic nanojet [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(7): 072901.
- [30] Devilez A, Bonod N, Wenger J, et al. Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres [J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2089-2094.
- [31] Dong A, Su C. Analysis of a photonic nanojet assuming a focused incident beam instead of a plane wave [J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(12): 125001.
- [32] Degtyarev SA, Porfirev AP, Khonina SN. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(12): B44-B48.
- [33] Han L, Han YP, Gouesbet G, et al. Photonic jet generated by spheroidal particle with Gaussian-beam illumination [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(7): 1476-1483.
- [34] Nguyen Pham HH, Hisatake S, Minin IV, et al. Three-dimensional direct observation of Gouy phase shift in a terajet produced by a dielectric cuboid [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(19): 191102.
- [35] Kong SC, Taflove A, Backman V. Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3722-3731.
- [36] Ruiz CM, Simpson JJ. Detection of embedded ultra-subwavelength-thin dielectric features using elongated photonic nanojets [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16805-16812.
- [37] Geints YE, Zemlyanov AA, Panina EK. Photonic nanojet calculations in layered radially inhomogeneous micrometer-sized spherical particles [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(8): 1825-1830.
- [38] Shen YC, Wang LV, Shen JT. Ultralong photonic nanojet formed by a two-layer dielectric microsphere [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4120-4123.
- [39] Gu GQ, Zhou R, Chen ZC, et al. Super-long photonic nanojet generated from liquid-filled hollow microcylinder [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 625-628.
- [40] Huang Y, Zhen ZS, Shen YC, et al. Optimization of photonic nanojets generated by multilayer microcylinders with a genetic algorithm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1310-1325.
- [41] Liu XC, Zhou HX, Yang M, et al. Photonic nanojets with ultralong working distance and narrowed beam waist by immersed engineered dielectric hemisphere [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 33959-33970.
- [42] Zhou Y, Ji R, Teng JH, et al. Ultralong light focusing via negative axicon microsphere [J]. *Engineering Research Express*, 2020, 2: 015044.
- [43] Yue Y, Hu XX, Wang RH, et al. Generation of long photonic nanojet by a self-assembled microdevice on optical fiber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 109043.
- [44] Umar M, Ozek EA, Abdul B, et al. Extremely long nanojet formation from a ballpoint photonic pen [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2023, 40(2): 284-292.
- [45] Ferrand P, Wenger J, Devilez A, et al. Direct imaging of photonic nanojets [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 6930-6940.
- [46] Wu MX, Chen R, Soh J, et al. Super-focusing of center-covered engineered microsphere [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31637.
- [47] Devilez A, Stout B, Bonod N, et al. Spectral analysis of three-dimensional photonic jets [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14200-14212.
- [48] Li X, Chen ZG, Taflove A, et al. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets [J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 526-533.

- [49] Lecler S, Haacke S, Lecong N, et al. Photonic jet driven non-linear optics: example of two-photon fluorescence enhancement by dielectric microspheres [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4935-4942.
- [50] Li YC, Liu XS, Yang XG, et al. Enhancing upconversion fluorescence with a natural bio-microlens [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(11): 10672-10680.
- [51] Yi KJ, Wang H, Lu YF, et al. Enhanced Raman scattering by self-assembled silica spherical microparticles [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(6): 063528.
- [52] Patel HS, Kushwaha PK, Swami MK, et al. Photonic nanojet assisted enhancement in transmission of light through hollow pyramid shaped near field probes [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(5): 055005.
- [53] Meleod E, Arnold CB. Subwavelength direct-write nanopatterning using optically trapped microspheres [J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(7): 413-417.
- [54] Kim J, Cho K, Kim I, et al. Fabrication of plasmonic nanodiscs by photonic nanojet lithography [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(2): 025201.
- [55] Qu C, Kinzel EC. Infrared metasurfaces created with off-normal incidence microsphere photolithography [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12632-12639.
- [56] Pierron R, Zelgowski J, Pfeiffer P, et al. Photonic jet: key role of injection for etchings with a shaped optical fiber tip [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2707-2709.
- [57] Wang ZB, Guo W, Li L, et al. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 218.
- [58] Krivitsky LA, Wang JJ, Wang ZB, et al. Locomotion of microspheres for super-resolution imaging [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3501.
- [59] Yang H, Trouillon R, Huszka G, et al. Super-resolution imaging of a dielectric microsphere is governed by the waist of its photonic nanojet [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(8): 4862-4870.
- [60] Monks JN, Yan B, Hawkins N, et al. Spider silk: mother nature's bio-superlens [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(9): 5842-5845.
- [61] Ghenuche P, Torres JD, Ferrand P, et al. Multifocus parallel detection of fluorescent molecules at picomolar concentration with photonic nanojets arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(13): 131102.
- [62] Yang H, Cornaglia M, Gijs MAM. Photonic nanojet array for fast detection of single nanoparticles in a flow [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1730-1735.
- [63] Li YC, Xin HB, Liu XS, et al. Trapping and detection of nanoparticles and cells using a parallel photonic nanojet array [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(6): 5800-5808.
- [64] Li YC, Xin HB, Lei HX, et al. Manipulation and detection of single nanoparticles and biomolecules by a photonic nanojet [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16176.
- [65] Cui XD, Erni D, Hafner C. Optical forces on metallic nanoparticles induced by a photonic nanojet [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13560-13568.
- [66] Kong SC, Sahakian A, Taflove A, et al. Photonic nanojet-enabled optical data storage [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13713-13719.
- [67] Yang S, Taflove A, Backman V. Experimental confirmation at visible light wavelengths of the backscattering enhancement phenomenon of the photonic nanojet [J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7084-7093.
- [68] Kapitonov AM, Astratov VN. Observation of nanojet-induced modes with small propagation losses in chains of coupled spherical cavities [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 409-411.
- [69] Gerlach M, Rakovich YP, Donegan JF. Nanojets and directional emission in symmetric photonic molecules [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17343-17350.

- [70] Duocastella M, Tantussi F, Haddadpour A, et al. Combination of scanning probe technology with photonic nanojets [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3474.
- [71] Born B, Krupa JDA, Geoffroy-Gagnon S, et al. Integration of photonic nanojets and semiconductor nanoparticles for enhanced all-optical switching [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8097.
- [72] Born B, Geoffroy-Gagnon S, Krupa JDA, et al. Ultrafast all-optical switching via subdiffractive photonic nanojets and select semiconductor nanoparticles [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1095-1101.
- [73] Ju DQ, Pei HZ, Jiang YY, et al. Controllable and enhanced nanojet effects excited by surface plasmon polariton [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(17): 171109.
- [74] Kim MS, Lahijani BV, Deschermes N, et al. Subwavelength focusing of Bloch surface waves [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1477-1483.
- [75] Wu XQ, Wang YP, Chen QS, et al. High-Q, low-mode-volume microsphere-integrated Fabry-Perot cavity for optofluidic lasing applications [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(1): 50-60.
- [76] Ren YX, Zeng XL, Zhou LM, et al. Photonic nanojet mediated backaction of dielectric microparticles [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(6): 1483-1490.
- [77] Uenohara T, Yasuda M, Mizutani Y, et al. Detection of shock wave in laser ablation using a photonic nanojet [J]. *Measurement: Sensors*, 2021, 18: 100217.
- [78] Guo JH, Wu Y, Gong ZY, et al. Photonic nanojet-mediated optogenetics [J]. *Advanced Science*, 2022, 9(12): 2104140.
- [79] Kwon S, Park J, Kim K, et al. Microsphere-assisted, nanospot, non-destructive metrology for semiconductor devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 32.
- [80] Liang LL, Teh DBL, Dinh ND, et al. Upconversion amplification through dielectric superlensing modulation [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1391.
- [81] Biccari F, Hamilton T, Ristori A, et al. Quantum dots luminescence collection enhancement and nanoscopy by dielectric microspheres [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2020, 37(1): 1900431.
- [82] Du CL, Kasim J, You YM, et al. Enhancement of Raman scattering by individual dielectric microspheres [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2011, 42(2): 145-148.
- [83] Chang TW, Wang XH, Mahigir A, et al. Marangoni convection assisted single molecule detection with nanojet surface enhanced Raman spectroscopy [J]. *ACS Sensors*, 2017, 2(8): 1133-1138.
- [84] Wang JG, Yang SL, Cao YR, et al. Microspheres on a silver film over nanoparticle arrays as optoplasmonic hybrid materials for surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2022, 126(17): 7542-7547.
- [85] Yan B, Yue LY, Monks JN, et al. Superlensing plano-convex-microsphere (PCM) lens for direct laser nano-marking and beyond [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1168-1171.
- [86] Li L, Guo W, Yan YZ, et al. Label-free super-resolution imaging of adenoviruses by submerged microsphere optical nanoscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2: e104.
- [87] Yang H, Moullan N, Auwerx J, et al. Super-resolution biological microscopy using virtual imaging by a microsphere nanoscope [J]. *Small*, 2014, 10(9): 1712-1718.
- [88] Zhu H, Yan B, Zhou SX, et al. Synthesis and super-resolution imaging performance of a refractive-index-controllable microsphere superlens [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(41): 10907-10915.
- [89] Lee S, Li L. Rapid super-resolution imaging of sub-surface nanostructures beyond diffraction limit by high refractive index microsphere optical nanoscopy [J]. *Optics Communications*, 2015, 334:

- 253-257.
- [90] Gu GQ, Zhou R, Xu HY, et al. Subsurface nano-imaging with self-assembled spherical cap optical nanoscopy [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4937-4948.
- [91] Darafsheh A. Influence of the background medium on imaging performance of microsphere-assisted super-resolution microscopy [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 735-738.
- [92] Yan YZ, Li L, Feng C, et al. Microsphere-coupled scanning laser confocal nanoscope for sub-diffraction-limited imaging at 25 nm lateral resolution in the visible spectrum [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1809-1816.
- [93] Lu DS, Pedroni M, Labrador-Páez L, et al. Nanojet trapping of a single sub-10 nm upconverting nanoparticle in the full liquid water temperature range [J]. *Small*, 2021, 17(7): 2006764.
- [94] Gu GQ, Song J, Chen M, et al. Single nanoparticle detection using a photonic nanojet [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(29): 14182-14189.
- [95] Li YC, Liu XS, Li BJ. Single-cell biomagnifier for optical nanoscopes and nanotweezers [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 61.
- [96] Li YC, Xin HB, Zhang Y, et al. Living nanospear for near-field optical probing [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(11): 10703-10711.
- [97] Chen XX, Wu TL, Gong ZY, et al. Lipid droplets as endogenous intracellular microlenses [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 242.