

纳米操作技术研究及应用进展

王根旺^{1,2}, 管延超^{1,2}, 王扬^{1,2}, 丁焯^{1,2**}, 杨立军^{1,2*}

¹哈尔滨工业大学微系统与微结构制造教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 纳米操作技术是实现纳米材料位移、排布、形变等操作的关键方法,也是一种“自下而上”制造性能优异的纳米结构及纳米电路的重要技术手段,同时也为新型纳米器件的研发提供了新思路。本文主要对基于扫描探针显微镜、电子显微镜的纳米操作技术以及光镊技术的研究进展进行了介绍及总结,简单阐述了三种操作技术的基本原理及特点,并在此基础上分析了不同操作技术存在的问题,介绍了几种典型的操作系统和操作策略的改进方法,进一步概括了三种操作技术在纳米材料测试及器件制造中的应用。最后针对三种操作技术的优势、适用范围以及目前仍存在的问题进行分析与总结,探讨了三种操作技术的适用范围,并对不同操作技术的结合进行了展望。

关键词 激光光学; 光镊或光操作; 纳米操作; 扫描探针显微镜; 电子显微镜; 纳米器件

中图分类号 TN492

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0802018

1 引言

电子器件及光电器件一直在遵循着摩尔定律不断发展,其特征尺寸不断减小并逐渐逼近极限。然而,尺寸减小带来的尺寸效应、量子效应、功耗增大等问题也会导致器件性能下降甚至失效,因此,当器件尺寸达到极限后,微电子技术将进入后摩尔时代。如何进一步突破传统硅基器件、实现器件多功能化以满足各行业的需求成为了不可避免的问题。在诸多后摩尔时代探索的道路上,利用纳米材料代替现有传统材料研发高性能、多功能器件是重要的发展方向之一。近年来,相关理论及实验研究已表明,零维材料、一维材料以及二维材料不仅可以作为电子器件及光电器件的沟道材料、电极材料及辅助结构材料,实现具有优异性能的多功能纳米器件,还有利于实现柔性、可穿戴器件的研制^[1-5]。因此,以纳米材料为基础的电子、光电纳米器件的研发是未来突破电子技术瓶颈的重要手段之一。

目前,纳米器件的制造方法多采取“自上而下”的手段,即利用紫外光刻、电子束光刻、激光直写等

技术构建器件电路,进而实现大规模器件及集成电路的制造。然而,随着对纳米器件研究的不断深入,人们发现,通过对单个纳米材料进行弯曲、折叠、扭转等,或对多个纳米材料进行连接、装配、排列等,可以实现特殊、复杂纳米结构的制造,获得性能更为优异的纳米器件^[6-7]。因此采用“自下而上”的手段,实现纳米材料精确定位、排布、装配、焊接的方法及装备成为了未来微电子技术发展的重要需求。自美国 IBM 公司实现原子搬迁以来^[8],纳米操作技术作为一种“自下而上”操纵纳米材料及制造纳米结构的重要手段,已被应用于纳米材料性能检测^[9]、纳米结构制造与装配^[10]、纳米光学^[11]以及生物医学等领域^[12]。该技术具有微纳米级别的操作精度,能够对单个纳米材料进行夹持、搬迁、放置、堆叠等位移操作以及拉伸、弯曲、扭转等变形操作;同时,该技术借助电子束诱导沉积、激光焊接、电子束辐照等能够实现纳米材料掺杂、焊接、装配等^[13],为纳米材料在新型功能器件中的应用提供了技术支撑。

纳米操作技术种类繁多,其中的一种是依托具有纳米级成像精度的显微镜进行操作的技术。例

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-01-07; 录用日期: 2021-02-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104900)、中国博士后科学基金(2020M670900)、黑龙江省博士后面上资助项目(LBH-Z20054)

*E-mail: yljtj@hit.edu.cn; **E-mail: dy1992hit@hit.edu.cn

如,基于扫描探针显微镜(SPM)、电子显微镜(EM)的操作,借助显微镜的成像系统,通过控制高精度运动模块使探针、镊子等工具进行纳米精度的运动,进而对纳米颗粒(NPs)、纳米线(NWs)、二维材料等进行推移、拾取、放置、弯曲等。除此之外,通过控制光场、磁场、声场等,使位于能场作用范围内的被操作对象受到力的作用而产生位移、旋转。基于这一原理的有光镊、磁镊、声镊等。另外,通过化学修饰等方法也可以实现纳米材料的自变形、自组装等^[14]。然而,综合考虑各操作技术的应用范围、设备成本、操作效果后可知,基于 SPM、EM 的操作技术和光镊技术在纳米材料操作及器件制造方面具有重要地位。因此,本文重点对基于 SPM、EM 的操作技术以及光镊技术的典型研究成果进行简要叙述及总结,并针对纳米材料操作及纳米结构的制造,分析不同操作技术及装备的主要特点,探讨其在器件制造应用中的前景,为纳米材料电子器件及光电器件的实现及发展提供新思路。

2 基于 SPM 的纳米操作技术

2.1 操作原理及特点

SPM 具有尖端半径为几纳米的探针、亚纳米级精度的运动系统以及高精度的反馈系统,因此,SPM 不仅可以对样品表面的纳米形貌进行成像,还可以对纳米材料进行操作。目前,主要的纳米操作技术为基于原子力显微镜(AFM)及扫描隧道显微镜(STM)的纳米操作技术。1994 年, Schaefer 等^[15]以 AFM 探针为操作工具,在室温下对 WSe_2 基底上的金颗粒进行了推移,实现了多个直径在 100 nm 以下的金颗粒按指定方向的移动,并最终汇聚形成了 Au NPs 团簇。类似地,Junno 等^[16]也利用 AFM 实现了直径为 30 nm 的 GaAs NPs 的移

动。在此基础上,Ramachandran 等^[17]在利用探针直接接触并推动 NPs 的基础上,根据 AFM 的力反馈信息对针尖与 NPs 之间的相对位置进行更精确的控制,实现了直径为 5 nm 和 15 nm 的 Au NPs 的操作。基于 STM 的操作技术在原理上与基于 AFM 的操作技术相似,也是利用探针针尖对被操作对象施加力的作用,使被操作对象产生位移。不同点是,基于 STM 的操作技术可以通过控制针尖与基底之间的电压、隧道电流产生的电场或热场来控制对被操作对象力的作用^[4,18-19]。

如图 1 所示,典型的基于 SPM 的操作技术可以分为三个主要步骤:1)对样本进行扫描成像,选取被操作对象并确定其位置;2)根据被操作对象的位置,设定探针接近并按一定方向推移被操作对象,此时探针无法进行扫描成像工作;3)当被操作对象被移动到目标位置后,再次对样本进行成像并获得操作后的图像信息。上述步骤可概括为成像→操作→成像的过程,该过程能够有效地对基底上的被操作对象进行推移,但也存在着重大不足:一方面,该方法要求探针针尖必须精确地作用在被操作颗粒的几何中心上,否则在推移过程中,颗粒极易从针尖处滑落,导致操作失败。同时,由于在操作过程中无法对探针针尖及颗粒的位置进行实时成像,进而难以对针尖作用位置及推移方向进行及时调整等,因此,较高精度的定位要求、缺乏实时成像、难以及时调整操作策略等问题大大降低了操作的成功率及效率。另一方面,由于操作工具仅仅为单根探针,因此该方法主要适用于纳米材料在基底上的推移操作,难以实现三维复杂操作,从而大大限制了该技术的应用范围。为了进一步提高操作成功率,探索该技术应用于复杂操作的可能性,需要对典型的 AFM 系统及操作策略进行进一步改进。

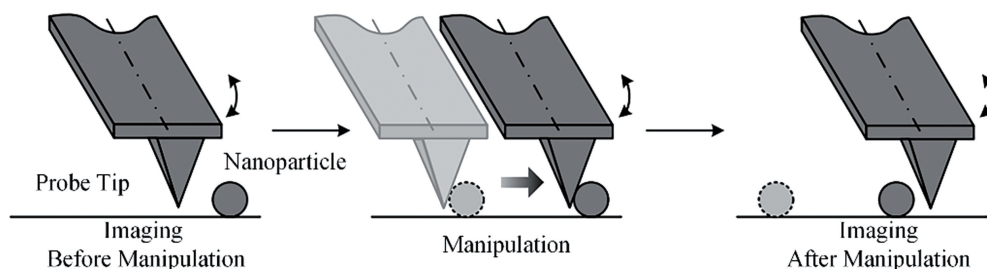


图 1 基于 SPM 的典型纳米操作的基本原理^[20]

Fig. 1 Principle of typical nano-manipulation based on SPM^[20]

2.2 实时成像信息的获取及操作策略优化

为提高基于 SPM 操作的成功率及效率,一方面,获取操作过程中实时的视觉反馈信息成为了突

破口之一。Kim 等^[21]提出了一种具有同步视觉引导的纳米操作技术,即在采用 AFM 探针推动颗粒的同时,能够获得颗粒运动轨迹的成像。该方法的

原理如图 2(a)所示,首先利用 AFM 探针对目标 NP 进行敲击,使其与基底之间的摩擦力变为动摩擦力,摩擦力减小;随后控制探针以合适的频率及速度进行横向扫描成像,由于目标 NP 的摩擦力小于其他的 NPs,因此该 NP 将沿垂直于扫描路径的方向移动,而其他 NPs 不产生位移。该方法的主要优势是,不需要使针尖精确地作用于 NPs 的几何中心,提高了操作效率,同时在操作过程中可以得到 NPs 运动轨迹的“鬼影”,如图 2(b)所示,因此能够对颗粒的移动情况作出准确判断。Li 等^[22]在 AFM 的基础上搭建了一套增强现实视觉系统,该系统可以根据 AFM 的力反馈信号对局部区域进行成像,使整个操作系统既有力反馈信息,也有视觉反馈信息,从而在一定程度上解决了操作过程中的成像问题。基于 AFM 的纳米操作技术难以获得实时成像的主要原因是单探针难以同时进行成像及操作,因此 Xie 等^[23-24]设计了一种可以同时成像及操作的

系统,如图 2(c)所示。通过控制两个不同探针的运动,使两个探针分别进行扫描及成像,可以实现操作与成像的同时进行。他们采用该系统完成了直径为 70 nm 的 NPs 的推移操作。可见,改进操作及成像策略、建立额外的视觉反馈系统、双探针分工协作等方法在一定程度上解决了被操作对象及探针针尖的实时位置获取问题。另一方面,通过改进操作策略进一步提高操作成功率及操作效率也至关重要。Xu 等^[25]提出了连续平行推移操作策略,该策略在操作时仅需确定被操作粒子中心的横向位置,减小了确定针尖推移位置的时间,提高了操作效率;而且,该策略可以通过观察 AFM 探针振幅的改变来判断颗粒是否脱离了针尖,进而可以确定粒子在推移方向上的纵向位置。Wang 等^[26]提出了虚拟纳米手操作策略,该策略主要利用 AFM 针尖去碰触 NWs 或 NPs 的不同位置,形成一种虚拟的纳米手,可以使 NWs 或 NPs 沿着预期轨迹运动,提高了操作的成功率。

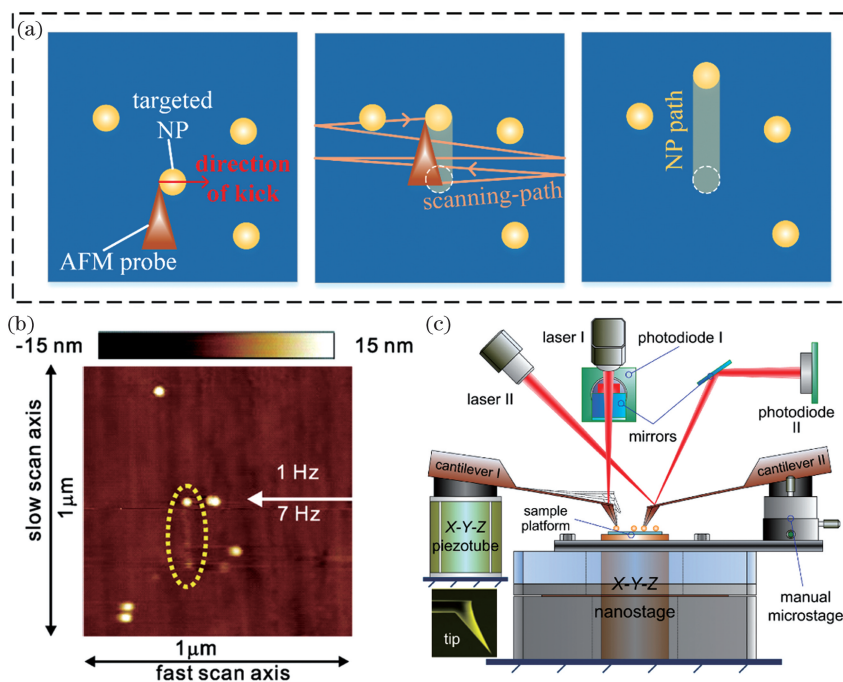


图 2 获取实时成像信息的纳米操作技术。(a) 具有同步视觉引导的纳米操作技术原理图^[21]; (b) 以运动粒子后的“鬼影”作为视觉信息^[21]; (c) 同时进行成像与操作的系统的原理图^[23]

Fig. 2 Nano-manipulation for acquiring real-time imaging. (a) Schematic of nano-manipulation with simultaneous visual guidance^[21]; (b) ghost images behind the moving particle provide a visual guidance^[21]; (c) schematic of the parallel imaging/manipulation system^[23]

2.3 三维复杂操作的实现

在实现 NPs、NWs 推移操作的基础上,进一步实现三维复杂操作是拓宽该技术应用的关键目标。Xie 等^[27]在双探针 AFM 系统的基础上进行了纳米材料的夹持、拾取、放置操作^[27]。其原理是利用双

AFM 探针针尖形成镊子,对 NWs 进行夹持,通过移动样品平台使 NWs 移动至预期位置,最后将其放置在基底或另一根 NWs 上。该方法实现了 NWs 的三维操作及装配,为纳米结构制造以及 NWs 同质结、异质结的构建提供了可能。Park 等^[28]将具有

圆形槽的甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 作为基底, 通过 AFM 探针的二维推动, 进行了金纳米球 (NSs) 的三维堆叠, 形成了一种三维等离子基元团簇, 如图 3 所示, 并探讨了该结构在不同光频率下的特殊电磁行为。Chen 等^[29] 利用 STM 对石墨烯沿着指定方向进行折叠和展开操作, 并对折叠角度实现了精确控

制。折叠后的双层石墨烯具有不同的扭曲角, 并且在边缘形成管状结构, 该管状结构具有类似碳纳米管的一维电子特性。该研究证明了基于 SPM 的纳米操作技术可以实现二维材料的复杂操作, 进而调控材料的光学、电学性能, 为制造高性能器件提供了技术手段。

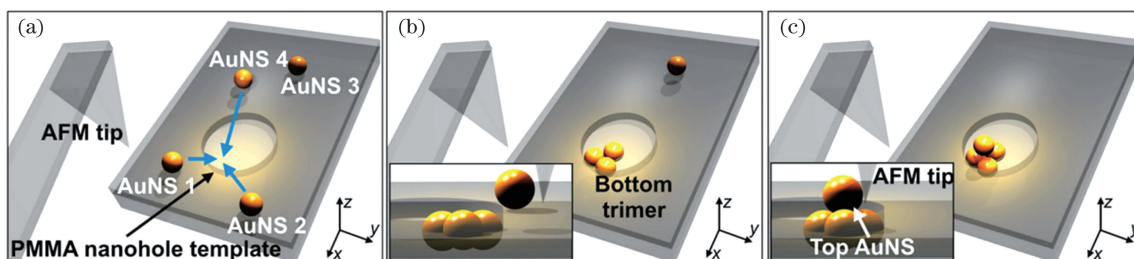


图 3 Au NSs 的三维装配过程示意图^[28]。(a) Au NSs 被转移至具有圆形槽的 PMMA 基底上; (b) 三个颗粒被推移至基底孔结构的底部形成三聚体; (c) 将最后一个颗粒移至三聚体上部

Fig. 3 Schematic of the "3D" assembly of Au NSs^[28]. (a) Au NSs were printed onto a PMMA nanohole template; (b) three Au NSs were pushed and dropped onto the bottom of the PMMA nanohole to form trimer; (c) remaining Au NS was pushed onto the already assembled trimer

2.4 纳米操作技术在纳米制造及纳米器件中的应用

近年来, 基于 SPM 的纳米操作技术由于具有纳米级别的成像及操作精度, 因而被广泛用于单个纳米材料的性能测试及调控中。Vasić 等^[30] 利用 AFM 对石墨烯进行侧向操作, 进而研究了石墨烯的边缘磨损行为, 并分析了石墨烯褶皱形成的临界条件。该研究表明, AFM 探针针尖对石墨烯施加的法向力大小以及石墨烯的边缘结构是影响边缘磨损行为的主要因素。van der Lit 等^[31] 利用 STM 对石墨烯纳米带进行了弯曲操作, 结果发现, 平面内的弯曲会使材料的能带间隙发生一定程度的变化, 但变化仅为 1.3%, 而利用操作实现的平面外的弯曲可以使纳米带边缘的碳原子与金基底接触, 形成 p 型碳纳米管结构, 实现材料性能的调控。另外, 基于

SPM 的操作还可以实现特殊纳米结构的装配及制造, 有利于高性能器件的研制。Ratchford 等^[11] 将 Au NPs 推移至 CdSe/ZnS 量子点附近, 构建了一种耦合结构。该结构表现出了极短的光致发光寿命, 有利于高调制速度光电器件的研发。类似地, Masuo 等^[32] 将金纳米立方体与 CdSe/ZnS 量子点结合, 使量子点由单光子发射变为多光子发射, 同时实现了荧光强度的增强及寿命的缩短。D'Orlando 等^[7] 将 Au NPs 装配成纳米等离子基元结构, 对该结构进行研究后发现, 该结构可以增强纳米材料的拉曼信号。Moreno-Moreno 等^[33] 通过 AFM 将 Au NWs 进行首尾对接排列, 并通过冷焊技术将对接的 NWs 进行互连, 实现了一种低电阻电路结构的制造, 如图 4 所示。每个连接处的电阻可小至

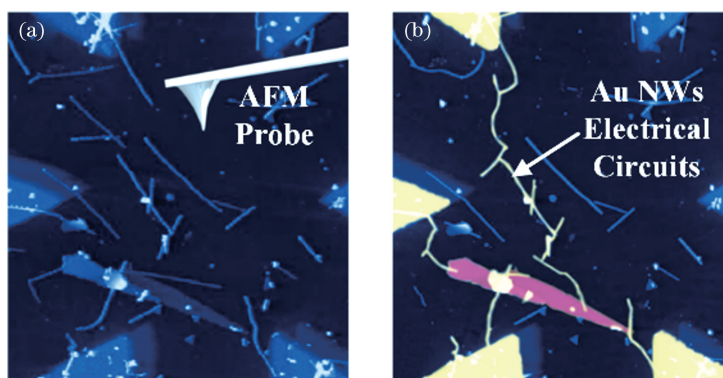


图 4 利用 AFM 操作 Au NWs 制造电路结构^[33]。(a) 操作前的 NWs 分布; (b) 操作后制造的电路结构

Fig. 4 AFM nano-manipulation of gold nanowires to build electrical circuits^[33]. (a) Distribution of nanowires before manipulation; (b) electrical circuits after manipulation

9 Ω ,而且该方法可以轻松实现电路的重构^[33]。该研究证明了基于 AFM 的操作技术是一种有望与光刻技术互补的纳米器件电路制造技术。

综上,基于 SPM 的纳米操作技术可以实现单个纳米材料的性能测试及调控、特殊纳米结构的装配及制造、纳米器件电路结构的制造等,是高性能器件研发的强有力工具之一。

3 基于 EM 的纳米操作技术

3.1 操作原理及特点

基于 SPM 的纳米操作技术的最大局限在于难以对操作过程进行实时成像,进而无法及时调整操作策略,使操作成功率大大下降。EM 利用电子束成像技术也可以对样品表面进行纳米级精度的成像,因此将 EM 作为视觉系统,与纳米操作平台相结合,可以实现对操作的实时监测及调整,极大地提高操作的灵活度和效率。常见方法主要包括基于扫描电子显微镜(SEM)及透射电子显微镜(TEM)的操作,二者在原理上基本相同,均是在显微镜的样品仓中建立纳米操作平台,根据显微镜的实时成像信息,通过控制运动平台带动探针、纳米刀、微镊子等工具进行操作。不同之处在于 TEM 相对于 SEM

的成像精度更高,有利于实现更高精度的操作,但 TEM 对纳米操作平台的紧凑性、真空兼容性以及平台对成像系统的干扰有更高的要求。

日本名古屋大学的 Fukuda 等^[34-35]较早设计了基于 SEM 的纳米操作机器人。如图 5(a)所示,该操作机器人包括 4 个具有纳米级精度的运动模块,每个模块可以独立控制样品或操作工具,形成“四探针”操作系统或“三探针-样品台”系统。该操作机器人系统共有 16 个自由度,运动模块包括粗定位及精定位两种工作模式,因此其操作空间范围可达厘米级,操作精度最高可达亚纳米级别。相对于基于 SPM 的操作系统,该系统具有灵活度高、操作空间大以及实时视觉反馈等特点,更有利于实现较大尺寸样品的操作以及复杂纳米结构的制造,同时可以对纳米材料进行拉伸等力学性能测试,如图 5(b)所示。随后,该研究团队在原有系统的基础上加装了冷却样品台,并将其应用于环境真空扫描电子显微镜中。改进后的系统通过冷却样品台对环境温度及湿度进行控制,并可以在低真空下成像。该研究团队利用自主设计的纳米刀^[36]和纳米叉^[37]实现了生物细胞操作系统^[38-39]。

与基于 SPM 的操作系统相比,基于 SEM 的操

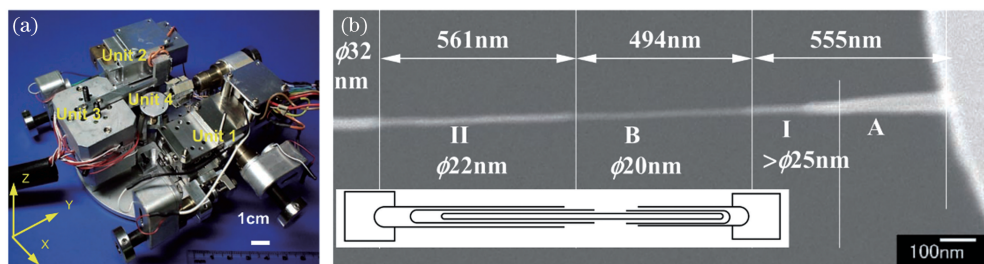


图 5 纳米操作机器人及其在纳米材料测试中的应用^[35]。(a)纳米操作机器人;(b)纳米管的拉伸

Fig. 5 Nanorobotic manipulators and its application in testing of nanomaterials^[35]. (a) Nanorobotic manipulators; (b) stretching of nanotubes

作系统凭借实时的视觉反馈以及灵活的运动系统,更适合用于复杂的三维操作。Zimmermann 等^[40]对微纳米粒子的加持、放置及堆叠操作进行了研究。他们利用探针与颗粒接触面积越大导致吸附力越大的原理,制造了较为细长的钨探针及具有口袋形状的探针。他们将前者作为放置探针,后者作为吸附探针,有效地实现了 NPs 的夹持、搬迁、放置等,还可以将颗粒堆叠成金字塔状。Denisyuk 等^[41]利用电子束对探针针尖进行辐照,使针尖部分产生电场,从而使电场作用下的 NPs 受到介电泳力的作用;当介电泳力大于基底对颗粒的范德瓦耳斯力时,颗粒就可以被探针从基底上拾取,有利于实现 NPs 的三维操作。

Yang 等^[42]建立了具有视觉反馈控制的纳米操作系统。基于该系统,他们利用数字图像处理技术在 SEM 的成像图中确定碳纳米管的位置,并控制操作工具从一堆纳米材料中拾取单根碳纳米管,实现了自动化的三维纳米操作,如图 6 所示。另外,基于 SEM 的操作系统可以安装不同的操作工具,使得该方法的应用范围进一步拓宽。Mølhave 等^[43]和 Sardan 等^[44]采用电子束光刻技术和聚焦离子束技术制造了一种微镊子,并将微镊子安装于基于 SEM 的操作系统中。这种微镊子不仅可以夹取细长的定制针尖,将其装配于 AFM 探针末端,获得可进行深沟槽测量的 AFM 探针^[45],还可用于 NWs 的夹持与放置^[46]。

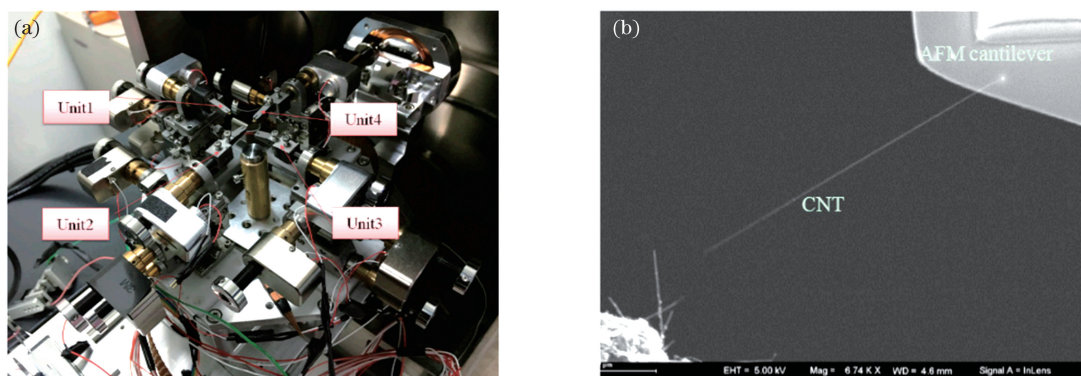


图 6 具有视觉反馈控制的操作系统^[42]。(a)操作平台;(b)利用 AFM 探针悬臂拾取碳纳米管

Fig. 6 Manipulation system with vision feedback control^[42]. (a) Manipulation system; (b) CNT picked up with AFM cantilever

3.2 优化操作系统的兼容性 & 深度信息的获取

多自由度、复杂的纳米操作平台有利于实现多种纳米材料的三维操作及性能测试,但其较为复杂的结构同样带来一些问题。随着平台结构复杂程度的增加,平台的结构间隙增多,因此会使 SEM 的抽真空效率大大降低,增加了置换样品的时间。并且,平台中较多的传感器在工作过程中会产生热量及噪声,使 SEM 成像出现漂移现象,不利于操作过程中的精确定位。针对这一问题,Zhang 等所在的研究团队^[47]对基于 SEM 的操作技术进行了改进。他们设计了一种“安装-锁定-兼容”的双探针纳米操作系统,该系统的整体尺寸为 100 mm × 80 mm × 46 mm,可以通过 SEM 的样品置换腔进行探针和样本的更换,避免了频繁打开 SEM 的真空腔,提高了换样效率。该团队还发现,SEM 在高真空及高加速电压下工作时,虽然可以获得较高分辨率的成像,但同时会使样品发生一定的损伤,而在低电压和低真空下工作时,成像结果会产生明显的噪声以及漂移现象。因此,他们在对操作系统进行改进的同时,利用图像处理技术对纳米操作系统的视觉系统进行了降噪及漂移补偿,实现了低电压及低真空下探针的自动定位功能^[48],操作平台与 EM 的兼容性得到了进一步改善。

由于 SEM 主要是对样品的表面进行二维成像,因此,仅通过 SEM 的成像信息无法获得操作过程中的深度信息,进而难以控制探针与被操作对象在深度方向的相对位置,易使探针与基底、样品发生碰撞而损坏。针对深度信息获取的问题,Eichhorn 等^[49]提出了两种获取深度信息的方法:一是通过调整 SEM 电子束的聚焦位置,利用 SEM 检测图像的灰度值变化来确定位于不同焦平面的物体之间的深

度差值。该方法较为容易实现,但获得的位置信息精度较低,无法达到微纳米级。二是设计一种振动式压电探针,当以一定频率振动的探针接近材料时,其振幅及相位发生变化,通过电信号的变化以及运动控制系统,可以计算出针尖至材料表面的距离,获得微纳米级别的位置信息。Zhou 等^[50]利用应变片设计了一种定位传感器,形成了一种闭环系统。该系统可以判断探针与基底、样品是否接触,同时该系统还具有低耗能、低产热及高速等特点。另外,Shen 等^[51]通过构建压敏电阻悬臂或激光反馈系统,使 AFM 探针可以进行接触式扫描,在一定程度上实现了 AFM 与 SEM 的集成,更加有利于获得操作过程中的高精度深度信息,但同时也增加了系统的复杂程度。

3.3 纳米操作技术在纳米制造及纳米器件中的应用

随着基于 EM 的纳米操作技术的不断发展,该技术应用于器件制造的想法被提出^[52]。一方面,利用 EM 的视觉反馈及压电探针的力反馈功能,可以进行纳米材料的性能测试。例如,可以进行单根 NWs 的拉伸及弯曲测试^[53],也可以进行二维材料的压痕实验以及局部力学性能测试^[54-55],并且配合电学性能测试仪还可以进行单根 NWs 的电学性能测试^[56]。这为高性能器件的研发提供了测试手段。另一方面,将基于 EM 的操作技术与其他制造加工技术相结合,可以对单个纳米材料进行制造加工。Ye 等^[57]利用图像处理技术建立了视觉伺服控制系统,该系统不仅可以自动识别易于操作的 NWs,并将 NWs 放置于微机电系统(MEMS)的电极上,还可以利用电子束诱导沉积(EBID)技术实现纳米硅与电极之间的焊接。Fukuda 等也借助图像处理技术研发了自动操作系统,该系统可对 NWs 进行自动识别、拾取及焊接等^[58-59]。Yu 等^[60]利用纳米操

作技术及 EBID 实现了碳纳米管与电极之间的焊接,如图 7 所示,并进一步分析了碳纳米管与金电极之间的连接电阻及受力。他们还利用聚焦离子束制造出了三维电极结构,通过探针对碳纳米管的三维

操作以及 EBID 连接技术,制造了基于碳纳米管的三维场效应晶体管^[61]。Yu 等的研究表明,基于 EM 的纳米操作系统可以进行纳米材料的电学性能测试以及制造纳米材料晶体管。

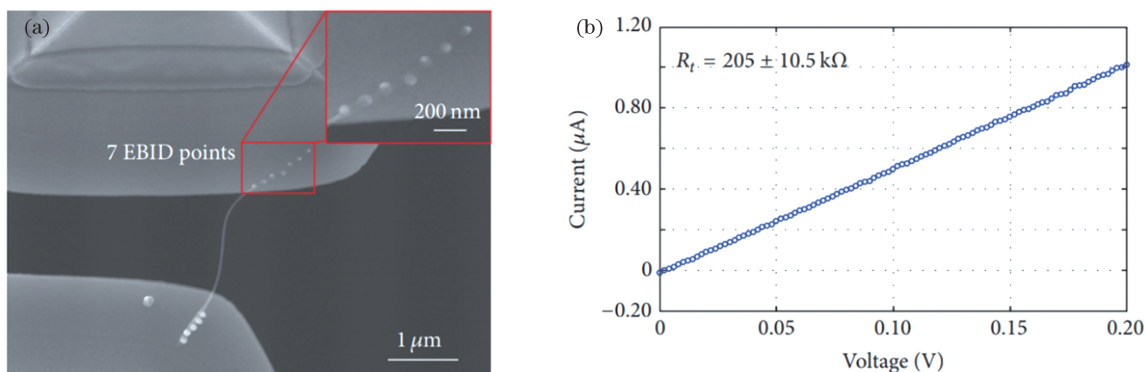


图 7 碳纳米管与金电极的互连及电学性能测试^[60]。(a)连接结构的 SEM 图;(b)碳纳米管与金电极的互连 I-V 曲线

Fig. 7 CNT/Au contact and electrical performance measurement^[60]. (a) SEM image of connection structure;

(b) measured I-V curve of CNT/Au contact

4 光镊技术

4.1 操作原理及特点

光镊技术也是一种微纳米操作技术,由 Ashkin 等^[62]提出,Ashkin 也因此获得了 2018 年诺贝尔物理学奖。当粒子处于光场中时,粒子与光进行动量交换,粒子因受到力的作用而发生移动、翻转等。因此,通过控制光对粒子的力的作用以及粒子受到的重力、支撑力、热梯度力、范德瓦耳斯力等其他力,可以实现微小粒子的移动、捕获。光镊技术是一种非接触式的操作技术,避免了操作工具与被操作对象的直接接触,减少了对被操作对象的损伤。但光镊产生的力相对较小,且被操作对象多分散在不同的溶液介质中,溶液的黏滞阻力和布朗力对操作有较大影响,影响操作的成功率,而且,溶液环境也限制了光镊技术的应用。目前,光镊技术在生物分子操作、微纳结构直写、微型器件制造等方面的研究较

多^[63-65]。

4.2 远场光镊技术及限制

按照使用的光源不同,光镊可分为远场光镊和近场光镊。由于远场光无法突破衍射极限,因此,激光作用范围难以达到纳米级别,从而加大了纳米级尺寸对象高精度操作的难度。光束整形技术可以形成不同类型的光学势阱,远场光镊正是基于这一点来捕获和移动 NPs、NWs 的。Yan 等^[66]基于光束整形技术设计了一种逆反射光路,并基于该光路获得了焦深较大的线性偏振贝塞尔光束。由于正光路与逆反光路同时作用,因此光场中的 Ag NWs 受到的辐射压力相互抵消,形成了稳定的三维光学势阱。Yan 等利用贝塞尔光束实现了长度为几微米的 Ag NWs 的捕获,操作精度小于 100 nm;此外,他们还通过改变偏振方向,实现了 Ag NWs 的旋转,旋转精度可达 1°,如图 8 所示。Jaffrey 等^[67]研究了纳米、微米颗粒在空气中的操作^[67],并采用波长为 1064 nm 的

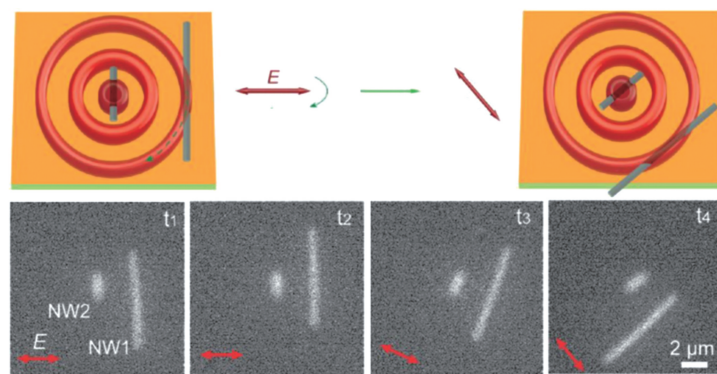


图 8 利用贝塞尔光束实现 NWs 的捕获及旋转操作^[66]

Fig. 8 Trapping and rotation of Ag nanowires by the Bessel-beam^[66]

高斯光束实现了直径为 80~1000 nm 粒子的稳定捕获。该方法与传统的溶液中捕获颗粒的方法相比,捕获时间相对较短,效率较高,但捕获的稳定性较差,金属颗粒在光束中受到的热作用也相对较大。因此,远场光镊主要适用于较大尺寸材料的捕获。

4.3 近场光镊及近场增强方法

与远场光相比,近场光突破了光学衍射极限,使激光的作用范围达到纳米量级,为高精度纳米操作提供了重要的技术手段。产生近场光的常见方法包括界面处全反射、激光辐照纳米金属尖端以及金属辐照纳米小孔等^[68-71]。然而,由于近场光的能量较小,其对纳米粒子的力的作用相对较小,难以克服粒子受到的范德瓦耳斯力等其他力的作用。因此,如何进行近场光增强成为了光镊技术的关键问题。Mandal 等^[72]提出了一种一维光子晶体谐振器结构,将其与波导管耦合后可使谐振器的孔状结构附近产生近场增强。该近场光可以捕获直径为 48~500 nm 的聚苯乙烯粒子。他们通过有限元计算发现,该结构可以对直径为 100 nm 的粒子产生 700 pN 的捕获力,比槽波导结构 25 pN 的捕获力高出了一个数量级。Saleh 等^[73]提出了一种同轴等离子体激元

光阑结构。他们通过仿真计算发现,当线性偏振平面光波辐照该光阑结构时,可以产生一种双光学势阱,该势阱可以捕获直径最小为 2 nm 的粒子。Zhang 等^[74]制造了一种纳米天线结构,该结构由间隙为 5~30 nm 的两个纳米棒组成。当采用波长为 808 nm 的激光辐照该结构时,狭缝处会产生表面等离子体激元,进而实现近场增强。该方法可以实现最小尺寸为 10 nm 的金颗粒的捕获。Chen 等^[75]也基于电子束光刻技术制造了二维等离子体基元光学晶格结构[如图 9(a)所示],该结构的每个单元结构由 4 个直径为 100 nm、厚度为 40 nm 的金纳米圆盘组成,圆盘之间的间隔约为 48 nm。当采用波长为 980 nm 的高斯激光光束辐照该二维阵列结构时,位于结构边缘的直径为 100 nm 和 500 nm 的纳米粒子将朝向激光辐照中心移动、聚集、排列。Gordon 所在的研究团队^[76-77]在金薄膜上加工了一种双纳米孔结构[如图 9(b)所示],结构中纳米孔的直径约为 110 nm,夹缝宽度约为 30 nm。采用两束激光对向辐照该双孔结构,可以对直径为 20 nm 的聚苯乙烯粒子、直径为 12 nm 的硅粒子进行捕获,同时 2 mW 的激光光源可以达到约为 0.2 fN/nm 的捕获刚度。

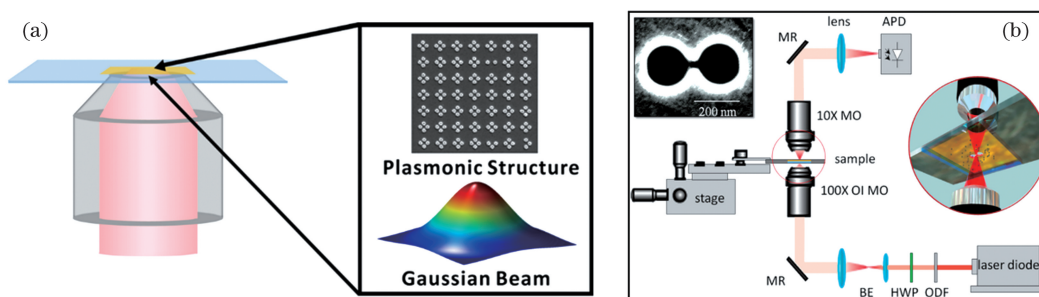


图 9 光镊操作中的近场光增强方法。(a)二维等离子体基元光学晶格结构^[75];(b)双纳米孔结构^[77]

Fig. 9 Enhancement of near-field optical tweezers manipulation. (a) Two-dimensional nanoscale plasmonic optical lattice^[75]; (b) double-nanohole structures^[77]

4.4 基于光纤探针的移动操作

上述研究主要通过光束整形获得稳定三维势阱或者辐照特殊纳米结构来实现对 NWs 及 NPs 的捕获,进而完成被操作对象在光场作用范围内的移动、旋转等有限运动。为进一步拓宽光镊技术的应用范围,在稳定捕获被操作对象后,还需要进一步控制被操作对象进行高精度、大范围的运动。然而,上述光操作技术的光路结构较为固定,极大地限制了操作范围。光纤探针不仅可以产生光场,还易于安装在高精度运动控制平台上,因此借助光纤探针有利于实现 NPs 或 NWs 在大范围内的三维移动操作。Taylor 等^[78]利用一种中空式的光纤探

针产生了一种环形光场,并采用该探针在水中直径为 2 μm 的玻璃球进行了捕获,实现了利用单根光纤探针对于粒子的稳定捕获。Anastasiadi 等^[79]在单个多芯光纤探针末端加工了多个斜面结构,形成了反射镜,从而使每个光纤纤芯中传输的激光发生反射并会聚一处形成了光学势阱,进而可对微米级粒子进行捕获。Liu 等^[80]在多模光纤探针上制造了一种锥形末端,获得了高强度梯度的三维光学势阱,实现了酵母菌的捕获及移动,如图 10 所示。Berthelot 等^[81]在光纤探针末端加工了蝴蝶结状的孔结构,该结构的狭缝宽度为 30~85 nm。当激光通过光纤传输辐照至探针末端的

蝴蝶结构或者激光直接在外辐照该结构时,蝴蝶结状孔的纳米狭缝处就会产生近场光,从而可以在水中对直径在 100 nm 以下的聚苯乙烯颗粒

进行捕获;同时,通过控制探针的移动,可以稳定控制 NPs 的移动,为进一步实现纳米材料的移动及装配提供了可能。

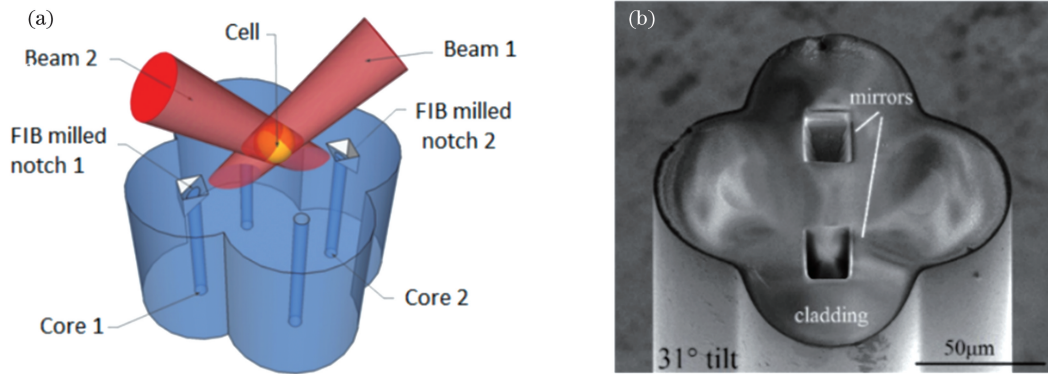


图 10 利用四芯光纤探针进行捕获及操作^[80]。(a)捕获操作原理示意图;(b)光纤末端结构的 SEM 图

Fig. 10 Trapping and manipulation by using the four-core fiber^[80]. (a) Schematic of trapping and manipulation; (b) SEM image of fiber-end

5 结束语

本文主要针对基于 SPM、EM 的纳米操作技术

及光镊技术的原理、特点、发展进行了简要介绍和总结,上述三种操作技术的主要特点及应用范围如表 1 所示。

表 1 基于 SPM、EM 的纳米操作技术和光镊技术的特点及应用范围

Table 1 Characteristic and application of nano-manipulation based on SPM, EM, and optical tweezers

| Method | Advantage | Disadvantage | Application |
|--------------------------------|---|---|--|
| Nano-manipulation based on SPM | Force-feedback system for accurately locating; Three-dimensional location information of objectives and probes | Limitation in real-time imaging during manipulation; Inadequacy in complex manipulation | Simple and high-precision manipulation for small objectives |
| Nano-manipulation based on EM | Real-time imaging during manipulation; Complex manipulation by using a variety of tools | Lack of depth information of objectives and probes; Only suitable for objectives which can withstand vacuum and irradiation of electron beam | Three-dimensional and complex manipulation; Fabrication and assembly of nano-structures |
| Optical tweezers | Non-contact manipulation; Suitable for particles up to several nanometers in diameter | Small optical forces; Manipulation in liquid environment | Trapping smaller objectives; Simple movement of objectives |

基于 SPM 的操作技术借助高精度的力反馈系统,不仅可以获得被操作对象及探针针尖的三维位置信息,还能够精确判断探针与被操作对象是否接触。通过控制二者之间的距离、电压差、隧道电流等,可以实现接触或非接触操作。因此,该技术可以对尺寸小至几十纳米的材料进行高精度操作。然而,由于操作及成像的实现均依赖于探针,因此该方法在操作过程的实时成像方面存在严重不足。虽然对操作系统及操作策略进行改进,可在一定程度上获得操作过程的视觉信息,但仍难以根据成像结果及时、灵活地调整操作策略。另外,探针的二维扫描

运动也使其在三维操作方面受到限制,仅能实现较小范围的三维操作,难以进行大尺寸复杂纳米结构的构建。

基于 EM 的操作技术的最大优势是可以对操作过程进行实时视觉监测,并且利用多个操作工具可以轻松实现复杂三维纳米操作。同时,AFM 探针、钨针、微镊子以及各种定制工具均可以用于操作,极大地拓宽了该技术的应用范围。但基于 EM 的操作系统会在一定程度上影响成像精度,并且 EM 的真空环境、电子束辐照等,使其难以对无法承受高真空及电子束辐照的材料进行操作。另外,该

技术的最大缺陷是难以获得操作过程中的深度信息,因此难以精准判断操作工具与被操作对象是否接触,易导致二者出现损伤,更难以进行非接触操作。其操作精度难以达到 SPM 操作的精度,也难以针对较小尺寸的对象进行操作。光镊技术目前主要被用来进行纳米材料的捕获、旋转及有限移动,其作为一种非接触的操作技术,减小了操作过程中对纳米材料的破坏。同时,通过控制光场的作用范围、强度等可以有效地操作几纳米的颗粒。但由于光对纳米材料的力的作用较小,且操作环境多为溶液,因此其应用范围受到了极大限制。

基于 SPM、EM 的操作逐渐被应用于纳米结构的制造及器件的研发:首先,可以通过基于 SPM、EM 的操作对材料的力学、电学、光学性能进行测试,并且可以通过拉伸、弯曲等操作实现材料性能的调控,为器件研发提供性能测试及调控方法;其次,利用基于 SPM、EM 的操作技术可以实现不同纳米材料的装配,进而制造出具有优异性能的纳米结构,有利于实现高性能器件的研发。另外,二者也为纳米电极制造、纳米焊接等提供了重要的技术手段。光镊技术目前主要被用于纳米材料的捕获及有限移动,并逐渐向大范围、高精度的三维操作方面发展;此外,光镊技术也可以用于电极结构的直写。因此,光镊技术也逐渐被用于纳米制造及器件研发。

基于 SPM、EM 的操作技术以及光镊技术在纳米操作、纳米制造及纳米器件研发等方面具有广阔的应用前景,这些技术是“自下而上”实现纳米材料定位、形变、装配等过程的重要方法,同时也为纳米焊接、纳米电路制造等提供了新的思路及技术手段。上述三种技术在适用对象、应用范围、操作效果等方面各具优势,但同时也存在各自亟待解决的关键技术问题及科学问题。值得注意的是,三种操作技术之间也存在一定的互补性。例如,在 EM 中建立 SPM 系统,可在获取实时的视觉信息的同时获得深度信息,实现探针与被操作对象的精确接触或非接触操作。因此,发展集成式的操作技术及系统将有利于纳米操作技术在纳米科学领域及微电子领域的进一步发展。

参 考 文 献

- [1] Seth S, Samanta A. Photoluminescence of zero-dimensional perovskites and perovskite-related materials [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2018, 9(1): 176-183.
- [2] Gong S, Cheng W L. One-dimensional nanomaterials for soft electronics [J]. Advanced Electronic Materials, 2017, 3(3): 1600314.
- [3] Cui J L, Cheng Y, Zhang J W, et al. Femtosecond laser irradiation of carbon nanotubes to metal electrodes[J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 476.
- [4] Lu X W, Yang L J, Yang Z. Photothermal sensing of nano-devices made of graphene materials [J]. Sensors, 2020, 20(13): 3671.
- [5] Wang G W, Hou C J, Long H, et al. Electronic and optoelectronic nanodevices based on two-dimensional semiconductor materials [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2019, 35(12): 1319-1340.
- [6] Castellanos-Gomez A, Roldán R, Cappelluti E, et al. Local strain engineering in atomically thin MoS₂ [J]. Nano Letters, 2013, 13(11): 5361-5366.
- [7] D'Orlando A, Bayle M, Louarn G, et al. AFM-nano manipulation of plasmonic molecules used as “nanolens” to enhance Raman of individual nano-objects [J]. Materials, 2019, 12(9): 1372.
- [8] Eigler D M, Schweizer E K. Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope [J]. Nature, 1990, 344(6266): 524-526.
- [9] Jiang C C, Lu H J, Zhang H T, et al. Recent advances on *in situ* SEM mechanical and electrical characterization of low-dimensional nanomaterials[J]. Scanning, 2017, 2017(8): 1985149.
- [10] Ono M, Kuramochi E, Zhang G Q, et al. Nanowire-nanoantenna coupled system fabricated by nanomanipulation[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8647-8659.
- [11] Ratchford D, Shafiei F, Kim S, et al. Manipulating coupling between a single semiconductor quantum dot and single gold nanoparticle[J]. Nano Letters, 2011, 11(3): 1049-1054.
- [12] Wang H P, Shi Q, Nakajima M, et al. Rail-guided multi-robot system for 3D cellular hydrogel assembly with coordinated nanomanipulation[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2014, 11(8): 121.
- [13] Shi C, Luu D K, Yang Q, et al. Recent advances in nanorobotic manipulation inside scanning electron microscopes [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2016, 2: 16024.
- [14] Xu W N, Qin Z, Chen C T, et al. Ultrathin thermoresponsive self-folding 3D graphene [J]. Science Advances, 2017, 3(10): e1701084.
- [15] Schaefer D M, Reifengerger R, Patil A, et al. Fabrication of two-dimensional arrays of nanometer-size clusters with the atomic force microscope [J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(8): 1012-1014.

- [16] Junno T, Deppert K, Montelius L, et al. Controlled manipulation of nanoparticles with an atomic force microscope[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(26): 3627-3629.
- [17] Ramachandran T R, Baur C, Bugacov A, et al. Direct and controlled manipulation of nanometer-sized particles using the non-contact atomic force microscope[J]. Nanotechnology, 1998, 9(3): 237-245.
- [18] Whitman L J, Strosio J A, Dragoset R A, et al. Manipulation of adsorbed atoms and creation of new structures on room-temperature surfaces with a scanning tunneling microscope [J]. Science, 1991, 251(4998): 1206-1210.
- [19] Avouris P. Manipulation of matter at the atomic and molecular levels[J]. Accounts of Chemical Research, 1995, 28(3): 95-102.
- [20] Liu B H. Basic research on integrated nanomanipulation using fiber probe-based near-field optical tweezers and AFM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 7-8.
刘炳辉. 光纤探针型近场光镊与 AFM 相集成的纳操作技术基础研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 7-8.
- [21] Kim S, Ratchford D C, Li X Q. Atomic force microscope nanomanipulation with simultaneous visual guidance[J]. ACS Nano, 2009, 3(10): 2989-2994.
- [22] Li G Y, Xi N, Yu M M, et al. Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(2): 358-365.
- [23] Xie H, Haliyo D S, Régnier S. Parallel imaging/manipulation force microscopy [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(15): 153106.
- [24] Xie H, Régnier S. High-efficiency automated nanomanipulation with parallel imaging/manipulation force microscopy [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2012, 11(1): 21-33.
- [25] Xu K M, Kalantari A, Qian X P. Efficient AFM-based nanoparticle manipulation via sequential parallel pushing[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2012, 11(4): 666-675.
- [26] Wang Z Y, Liu L Q, Wang Y C, et al. Stable nanomanipulation using atomic force microscopy: a virtual nanohand for a robotic nanomanipulation system[J]. IEEE Nanotechnology Magazine, 2013, 7(4): 6-11.
- [27] Xie H, Haliyo D S, Régnier S. A versatile atomic force microscope for three-dimensional nanomanipulation and nanoassembly [J]. Nanotechnology, 2009, 20(21): 215301.
- [28] Park K J, Huh J H, Jung D W, et al. Assembly of “3D” plasmonic clusters by “2D” AFM nanomanipulation of highly uniform and smooth gold nanospheres[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 6045.
- [29] Chen H, Zhang X L, Zhang Y Y, et al. Atomically precise, custom-design origami graphene nanostructures[J]. Science, 2019, 365(6457): 1036-1040.
- [30] Vasić B, Matković A, Gajić R, et al. Wear properties of graphene edges probed by atomic force microscopy based lateral manipulation [J]. Carbon, 2016, 107: 723-732.
- [31] van der Lit J, Jacobse P H, Vanmaekelbergh D, et al. Bending and buckling of narrow armchair graphene nanoribbons via STM manipulation [J]. New Journal of Physics, 2015, 17(5): 053013.
- [32] Masuo S, Kanetaka K, Sato R, et al. Direct observation of multiphoton emission enhancement from a single quantum dot using AFM manipulation of a cubic gold nanoparticle [J]. ACS Photonics, 2016, 3(1): 109-116.
- [33] Moreno-Moreno M, Ares P, Moreno C, et al. AFM manipulation of gold nanowires to build electrical circuits[J]. Nano Letters, 2019, 19(8): 5459-5468.
- [34] Fukuda T, Arai F, Dong L. Assembly of nanodevices with carbon nanotubes through nanorobotic manipulations [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(11): 1803-1818.
- [35] Fukuda T, Arai F, Dong L X. Nanorobotic systems [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2005, 2(3): 28.
- [36] Shen Y J, Nakajima M, Yang Z, et al. Design and characterization of nanoknife with buffering beam for *in situ* single-cell cutting[J]. Nanotechnology, 2011, 22(30): 305701.
- [37] Ahmad M R, Nakajima M, Kojima M, et al. Nanofork for single cells adhesion measurement via ESEM-nanomanipulator system[J]. IEEE Transactions on NanoBioscience, 2012, 11(1): 70-78.
- [38] Ahmad M R, Nakajima M, Kojima S, et al. *In situ* single cell mechanics characterization of yeast cells using nanoneedles inside environmental SEM [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2008, 7(5): 607-616.
- [39] Ahmad M R, Nakajima M, Kojima M, et al. Instantaneous and quantitative single cells viability determination using dual nanoprobe inside ESEM[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2012, 11(2): 298-306.

- [40] Zimmermann S, Tiemerding T, Fatikow S. Automated robotic manipulation of individual colloidal particles using vision-based control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2031-2038.
- [41] Denisyuk A I, Komissarenko F E, Mukhin I S. Electrostatic pick-and-place micro/nanomanipulation under the electron beam [J]. Microelectronic Engineering, 2014, 121: 15-18.
- [42] Yang Z, Wang Y Q, Yang B, et al. Mechatronic development and vision feedback control of a nanorobotics manipulation system inside SEM for nanodevice assembly [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1479.
- [43] Mølhave K, Wich T, Kortschack A, et al. Pick-and-place nanomanipulation using microfabricated grippers[J]. Nanotechnology, 2006, 17(10): 2434-2441.
- [44] Sardan O, Eichhorn V, Petersen D H, et al. Rapid prototyping of nanotube-based devices using topology-optimized microgrippers[J]. Nanotechnology, 2008, 19(49): 495503.
- [45] Rajendra K R T, Hassan S U, Sardan S O, et al. Nanobits: customizable scanning probe tips [J]. Nanotechnology, 2009, 20(39): 395703.
- [46] Carlson K, Andersen K N, Eichhorn V, et al. A carbon nanofibre scanning probe assembled using an electrothermal microgripper [J]. Nanotechnology, 2007, 18(34): 345501-345507.
- [47] Zhang Y L, Zhang Y, Ru C H, et al. A load-lock-compatible nanomanipulation system for scanning electron microscope [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 230-237.
- [48] Gong Z, Chen B K, Liu J, et al. Robotic probing of nanostructures inside scanning electron microscopy [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(3): 758-765.
- [49] Eichhorn V, Fatikow S, Wich T, et al. Depth-detection methods for microgripper based CNT manipulation in a scanning electron microscope [J]. Journal of Micro-Nano Mechatronics, 2008, 4(1/2): 27-36.
- [50] Zhou C, Gong Z, Chen B K, et al. A closed-loop controlled nanomanipulation system for probing nanostructures inside scanning electron microscopes [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(3): 1233-1241.
- [51] Shen Y J, Nakajima M, Zhang Z H, et al. Dynamic force characterization microscopy based on integrated nanorobotic AFM and SEM system for detachment process study [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 3009-3017.
- [52] Fatikow S, Eichhorn V, Bartenwerfer M. Nanomaterials enter the silicon-based CMOS era: nanorobotic technologies for nanoelectronic devices [J]. IEEE Nanotechnology Magazine, 2012, 6(1): 14-18.
- [53] Dong L X, Arai F, Fukuda T. Destructive constructions of nanostructures with carbon nanotubes through nanorobotic manipulation [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(2): 350-357.
- [54] Zimmermann S, Tiemerding T, Li T, et al. Automated mechanical characterization of 2-D materials using SEM based visual servoing [J]. International Journal of Optomechatronics, 2013, 7(4): 283-295.
- [55] Mikczinski M R, Josefsson G, Chinga-Carrasco G, et al. Nanorobotic testing to assess the stiffness properties of nanopaper [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(1): 115-119.
- [56] Ru C H, Zhang Y, Sun Y, et al. Automated four-point probe measurement of nanowires inside a scanning electron microscope [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2011, 10(4): 674-681.
- [57] Ye X T, Zhang Y, Ru C H, et al. Automated pick-place of silicon nanowires [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(3): 554-561.
- [58] Shi Q, Yang Z, Guo Y N, et al. A vision-based automated manipulation system for the pick-up of carbon nanotubes [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 845-854.
- [59] Ding H Y, Shi C Y, Ma L, et al. Visual servoing-based nanorobotic system for automated electrical characterization of nanotubes inside SEM [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1137.
- [60] Yu N, Nakajima M, Shi Q, et al. Characterization of the resistance and force of a carbon nanotube/metal side contact by nanomanipulation [J]. Scanning, 2017, 2017: 5910734.
- [61] Yu N, Shi Q, Nakajima M, et al. 3D assembly of carbon nanotubes for fabrication of field-effect transistors through nanomanipulation and electron-beam-induced deposition [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 27(10): 105007.
- [62] 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.
- [63] Li Y M, Gong L, Li D, et al. Progress in optical

- tweezers technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0101001.
- 李银妹, 龚雷, 李迪, 等. 光镊技术的研究现状 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0101001.
- [64] Chen Z Y, Fang G, Cao L C, et al. Direct writing of silver micro-nanostructures by femtosecond laser tweezer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402006.
- 陈忠贇, 方淦, 曹良成, 等. 飞秒激光光镊直写银微纳结构 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402006.
- [65] Peng F, Yao B L, Lei M, et al. Fabrication of micro devices by use of optical tweezers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(5): 1245-1252.
- 彭飞, 姚保利, 雷铭, 等. 利用光镊系统制作微型器件 [J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1245-1252.
- [66] Yan Z J, Jureller J E, Sweet J, et al. Three-dimensional optical trapping and manipulation of single silver nanowires [J]. Nano Letters, 2012, 12(10): 5155-5161.
- [67] Jauffred L, Taheri S M R, Schmitt R, et al. Optical trapping of gold nanoparticles in air [J]. Nano Letters, 2015, 15(7): 4713-4719.
- [68] Liu B H, Yang L J, Wang Y. Optical trapping force combining an optical fiber probe and an AFM metallic probe [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3703-3714.
- [69] Lu X W, Yang L J, Xie H, et al. Simulations of the near-field enhancement on AFM tip irradiated by annular laser beam [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2019, 18: 979-982.
- [70] Cui J L, Yang L J, Wang Y. Simulation study of near-field enhancement on a laser-irradiated AFM metal probe [J]. Laser Physics, 2013, 23(7): 076003.
- [71] Ghosh S, Ghosh A. Next-generation optical nanotweezers for dynamic manipulation: from surface to bulk [J]. Langmuir, 2020, 36(21): 5691-5708.
- [72] Mandal S, Serey X, Erickson D. Nanomanipulation using silicon photonic crystal resonators [J]. Nano Letters, 2010, 10(1): 99-104.
- [73] Saleh A A E, Dionne J A. Toward efficient optical trapping of sub-10-nm particles with coaxial plasmonic apertures [J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5581-5586.
- [74] Zhang W H, Huang L N, Santschi C, et al. Trapping and sensing 10 nm metal nanoparticles using plasmonic dipole antennas [J]. Nano Letters, 2010, 10(3): 1006-1011.
- [75] Chen K Y, Lee A T, Hung C C, et al. Transport and trapping in two-dimensional nanoscale plasmonic optical lattice [J]. Nano Letters, 2013, 13(9): 4118-4122.
- [76] Pang Y J, Gordon R. Optical trapping of 12 nm dielectric spheres using double-nanoholes in a gold film [J]. Nano Letters, 2011, 11(9): 3763-3767.
- [77] Kotnala A, Gordon R. Quantification of high-efficiency trapping of nanoparticles in a double nanohole optical tweezer [J]. Nano Letters, 2014, 14(2): 853-856.
- [78] Taylor R S, Hnatovsky C. Particle trapping in 3-D using a single fiber probe with an annular light distribution [J]. Optics Express, 2003, 11(21): 2775-2782.
- [79] Anastasiadi G, Leonard M, Paterson L, et al. Fabrication and characterization of machined multi-core fiber tweezers for single cell manipulation [J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3557-3567.
- [80] Liu Z H, Wang T, Zhang Y X, et al. Single fiber dual-functionality optical tweezers based on graded-index multimode fiber [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(5): 053501.
- [81] Berthelot J, Acimović S S, Juan M L, et al. Three-dimensional manipulation with scanning near-field optical nanotweezers [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(4): 295-299.

Recent Progress in Research and Application of Nano-Manipulation Technologies

Wang Genwang^{1,2}, Guan Yanchao^{1,2}, Wang Yang^{1,2}, Ding Ye^{1,2**}, Yang Lijun^{1,2*}

¹Key Laboratory of Microsystems and Microstructures Manufacturing, Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

²School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract

Significance Continuous miniaturization of traditional silicon electronic devices and photoelectric components increases the integration and performance of devices and introduces some undesirable problems caused by the size and

quantum effects, and increased power consumption. Thus, the development of multifunctional next-generation nano-devices with more excellent performance than traditional devices is inevitable and significant in the post-Moore era. Owing to the excellent mechanical, thermal, electrical, and optical properties of nanomaterials, such as nanoparticles, quantum dots, nanowires, nanotubes, and two-dimensional (2D) materials, many studies have suggested that these materials are suitable for channel or electrode of multifunctional and high-performance nano-devices. Thus, the study and development of nano-devices based on nanomaterials are crucial for solving the bottleneck problems of electronics in the future.

Recently, abundant theoretical and experimental results have demonstrated that bending, folding, twisting a single nanomaterial, and arranging, assembling, connecting several nanomaterials can improve properties further or bring extraordinary characteristics of nano-devices. For instance, compared with chemical doping and contact engineering, deformation of 2D materials can solve the Fermi-level pinning and carrier concentration decreasing in nano-devices and may introduce new phenomena, such as piezotronics and piezo-phototronics. Thus, methods and accompanying systems for moving, arranging, deforming nanomaterials, and fabricating nano-structures and nano-devices will be crucial and indispensable in the electronics field in the future. The most “top-down” approaches for fabricating electronic and optoelectronic devices, such as ultraviolet lithography, electron beam lithography, and laser writing, are unfit for the mentioned purpose. Instead, nano-manipulation technology, as a “bottom-up” method, is proposed to move or spin atoms, nanomaterials, and cells in the nanoscale resolution. Based on this, it is promising in moving, deforming, and assembling nanomaterials in high-precision than other methods. For example, some indirect methods for bending 2D materials (e. g., thermal expansion mismatch, deformation of flexible substrates, and substrate surface topography modification) exist some problems, such as slipping of materials, small deformation, and uncontrollability. Nano-manipulation can use probes to push or fold materials in nano-/micro-scale directly and achieve large, complex, and controllable deformation. With electron beam-induced deposition, laser processing, and nano-welding, this technology can also develop nano-structures with excellent properties, weld a single material onto an electrode to fabricate devices, and test properties of a single material and device. Thus, it provides a new idea for the development of new-generation nano-devices with excellent performance.

Among many nano-manipulation techniques, methods and systems based on the microscopes with nano-level imaging accuracy, e. g., scanning probe microscope (SPM) and electron microscope (EM), are widely used. With the microscope monitor, the system controls the motion module to move the probes, tweezers and other manipulation tools in high-precision, and then moves, picks up, and bends nanoparticles (NPs), nanowires (NWs), and 2D materials. Besides, optical tweezers, magnetic tweezers, and acoustic tweezers can apply force to materials and trap or move these further by controlling the optical, magnetic, and sound fields. To develop nano-devices, manipulation methods based on SPM, EM, and optical tweezers are promising and anticipated. Thus, it is necessary and significant to introduce and summarize the recent studies in these nano-manipulation methods and understand their application in nano-devices.

Progress This study introduces the recent research in nano-manipulation based on scanning probe microscope (SPM), electron microscope (EM), and optical tweezers. For SPM manipulation, the principles and typical process demonstrate the capacity for accurately moving particles of tens to a few nanometers in diameter and weakness in real-time imaging, efficient and complex manipulation. For real-time imaging during manipulation, representative improvements include strategy optimization and development of parallel imaging/manipulation system (Fig. 2). The strategy optimization can also improve the success rate and efficiency, like sequential parallel pushing and virtual nano-hand strategies. To achieve three-dimensional (3D) and complex manipulation, researchers proposed new approaches to pile up nanoparticles and nanowires using a special substrate or two probes. With the development of strategies and systems, SPM manipulation applications were proposed in the field of nano-devices, such as testing mechanical and electronic properties, building plasma nano-structures, and fabricating electrodes of nano-devise. To achieve real-time imaging, Fukuda' group concentrated on EM manipulation. They invented nanorobotic manipulators inside the scanning electron microscope (SEM) and used it to stretch nanotubes, cut cells, and test mechanical properties (Fig. 5). EM manipulation is more suitable than SPM manipulation for complicated works due to real-time imaging and flexible manipulators. Complex manipulators also cause noise and drift in EM imaging. Sun' group invented various manipulators for compatibility with EM. Another major drawback of EM manipulation is the lack of depth information, which is critical to judge the contact between probes and materials. Thus, touchdown sensor, piezo fine positioner, laser displacement sensor, and other improvements are used to acquire precise 3D information.

EM manipulation is widely used in bending and twisting materials, nano-welding, fabricating transistors because of its flexibility. Optical tweezers are used in trapping nanoparticles and nanowires. Especially, near-field optical tweezers can trap particles up to several nanometers in diameter. To achieve a successful and superior manipulation, researchers concentrated on the enhancement of the optical field. Besides, fiber probes were suggested for trapping then moving nanomaterials. These researches showed optical tweezers are potential for manipulating smaller objectives to develop nano-devices.

Conclusions and Prospects SPM manipulation, EM manipulation, and optical tweezers have their advantages, limitations, and applications (Table 1). These provide new ideas and technical means for moving and assembling nanomaterials and manufacturing nano-structures and nano-devices. However, these methods and systems also face technical and scientific challenges. Thus, the development of integrated manipulation methods and systems will facilitate the applications in the field of nanoscience and electronics.

Key words laser optics; optical tweezers or optical manipulation; nano-manipulation; scanning probe microscope; electron microscope; nano-devices

OCIS codes 140.7010; 350.4855; 350.3850