

聚焦激光束在微纳材料中的应用

刘琳¹ 刘宏微^{2,†} 吕俊鹏^{1,††}

(1 东南大学物理学院 南京 211189)

(2 南京师范大学物理科学与技术学院 南京 210023)

2019-05-24收到

† email: phylhw@nju.edu.cn

†† email: phyljp@seu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20191205

Applications of focused laser beams in micro-nano materials

LIU Lin¹ LIU Hong-Wei^{2,†} LU Jun-Peng^{1,††}

(1 School of Physics, Southeast University, Nanjing 211189, China)

(2 School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

摘要 低维微纳材料因其特有的小尺寸效应以及由此而来丰富的物理性质, 预示着其在后摩尔时代的电子、光电器件中 will 发挥重要作用。由于微纳材料的小尺寸特性, 通过运用传统技术, 很难实现对微纳材料的精准操控, 制约了微纳材料在微型化、集成化、多元化器件中的应用。文章回顾了聚焦激光技术的发展历程, 重点介绍如何通过聚焦激光束实现对微纳材料的精准操控、加工与改性, 并对聚焦激光技术的研究前景进行展望。

关键词 聚焦激光束, 微纳材料, 微纳操控, 微纳加工, 微纳改性

Abstract Low-dimensional micro-nano materials will play an important role in electronic and optoelectronic devices in the post-Moore law period because of their unique small size effects and their resulting interesting physical properties. Due to the small size characteristics of micro-nano materials, it is difficult to achieve precise control using traditional techniques. This restricts the application of micro-nano materials in miniaturized, integrated and diversified devices. This article presents a review on the development of focused laser beam technology, especially on how it can be used to achieve the precise manipulation, manufacture and modification of micro-nano materials. Finally, we look at the future prospects of focused laser beam technology.

Keywords focused laser beam, micro-nano materials, micro-nano manipulation, micro-nano manufacture, micro-nano modification

1 光学捕获的研究历史

光可以通过散射的动量交换对物质施加力, 称为光辐射压力^[1]。1901年, 科学家列别捷夫^[2]、尼克尔斯和赫尔^[3]首次在实验上观察到了光辐射压力的存在。他们使用热光源(电灯或弧光灯)和扭转天平进行了实验。当光聚焦在天平上的镜子上时, 辐射压力使天平从其平衡位置移动。因为热光源产生的辐射压力非常有限, 这个现象在激

光被发现之前很长一段时间并没有引起太多关注。直到激光的发现之后, 1970年美国科学家阿瑟·阿什金利用激光首次实现了微米级粒子的光学捕获和操纵, 验证了使用光学力来操控微米级粒子和中性原子的可能性^[4, 5]。从那时起, 光子力相关的研究开始大量地集中于两个尺度范围: 亚纳米尺度和微米尺度。前者利用光与物质的机械耦合作用能够冷却原子、离子和分子; 后者利用光散射产生的动量转移用来操纵如细胞大小的微



图1 从左至右依次为1997年诺贝尔物理学奖获得者朱棣文、科恩·塔诺季、菲利普斯和2018年诺贝尔物理学奖获得者阿瑟·阿什金

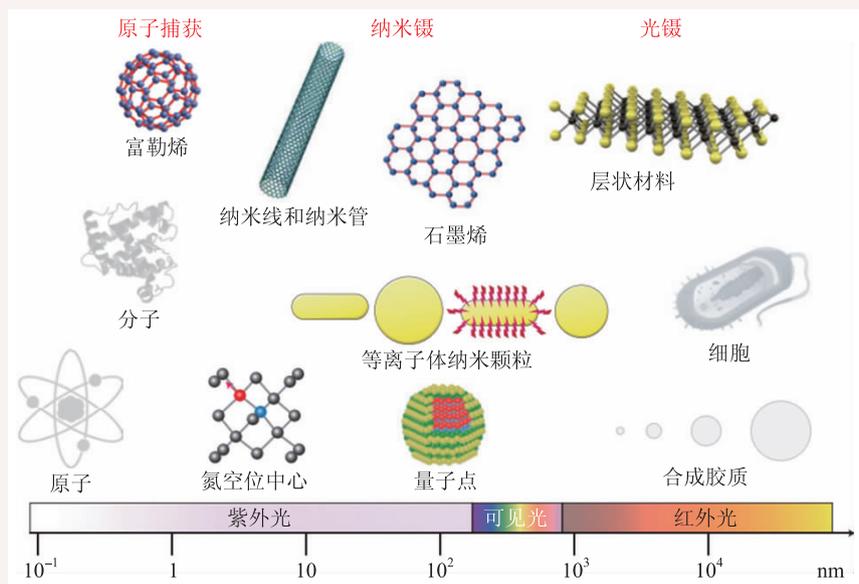


图2 各类代表性微纳材料尺寸和光捕获技术对应关系图，横坐标标示材料的尺寸以及对应的光波长^[16]

可以降低原子速度分布。纳米结构缺乏这些特征，限制了冷却速率和可达到的最低温度。用于操纵微米粒子的技术依赖于电偶极相互作用能^[13, 14]。这个作用力随着物体体积的减小而急剧降低，所以热波动大到足以压倒纳米尺度的俘获力^[15]。而对纳米材料(包括量子点、纳米线、纳米管、石墨烯和二维晶体等)的精确操控对新一代电子、光电子器件的开发尤为重要，因此基于纳米尺度的光学捕获技术近年来得以快速发展。此外，随着激光技术的进步，聚焦激光束的功能也得以拓展，在对微纳材料操控的基础上，激光微纳加工、激光微纳改性等技术大量地应用于微纳材料，极大地促进了微纳材料在器件方面的应用进程。本文着重介绍聚焦激光束技术在微纳材料激光微纳操控、

观物体。激光冷却原子的早期技术为现代超冷原子技术铺平了道路^[6-9]。而对微观物体的操控发展为后期的光镊技术——能够在三维空间中捕获粒子的聚焦激光束，其已经成为操纵微米尺度物体和高灵敏度力学传感的常用工具^[10-12]。因激光冷却和原子陷阱方面的贡献，美籍华人科学家朱棣文、科恩·塔诺季和菲利普斯一起被授予1997年诺贝尔物理学奖。因光镊技术的贡献，阿瑟·阿什金被授予2018年诺贝尔物理学奖(图1)。

近年来，纳米技术快速发展。纳米技术的发展依赖于纳米材料(尺寸范围：约1—100 nm)的开发与利用，但想要将光操控技术应用于纳米尺度存在很大挑战。实际上，原子的高效激光冷却依赖于靠近窄谱线的光散射，没有辐射损失，从而

微纳加工和微纳改性方面的应用与进展。

2 激光微纳操控

低维微纳材料通常分为3种形式。三维空间内，有一个维度受限的是二维材料，如石墨烯、磷烯等二维原子晶体；若两个维度受限，则为一维材料，如碳纳米管、纳米线等；如果三维空间都受限，则为零维材料，如量子点、纳米颗粒等。在对低维微纳材料进行激光操控时，随着材料尺寸的不同，所运用到的光波长、捕获技术等有所不同(图2)。

我们以零维材料为例，介绍光子力的产生。零维材料的光学响应通常可以由偶极子或偶极子

集合的光学响应作为模型。偶极极化率决定了与光场相互作用的强度。对于半径为 r 和相对介电常数 ϵ 的球体, 偶极极化率可以表示为^[17]

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 - \frac{ik^3\alpha_0}{6\pi\epsilon_0}}, \quad (1)$$

$$\alpha_0 = 4\pi\epsilon_0 r^3 (\epsilon - 1) / (\epsilon + 2),$$

其中 α_0 是由 Clausius—Mossotti 关系式给出的点状粒子极化率, k 是场波矢, ϵ_0 是真空介电常数。作用于这种偶极子的光子力可表示为^[13]

$$\langle F \rangle = \frac{1}{2} \text{Re} \left(\sum_{j=x,y,z} \alpha E_j \nabla E_j^* \right), \quad (2)$$

其中 E_j 是电场分量。等式(2)可以更加一目了然地写成^[18]:

$$\langle F \rangle = \frac{1}{4} \text{Re}(\alpha) \nabla |E|^2 + \frac{\sigma}{2c} \text{Re}(E \times H^*) + \frac{\sigma c \epsilon_0}{4\omega i} \nabla \times E \times E^*, \quad (3)$$

其中 σ 是消光截面, E 是电场, H 是磁场, c 是真空中光速, ω 是光场角频率。等式(3)中的第一项是由电场强度梯度引起的力, 主导了光镊中的三维约束, 并且决定了第二和第三项。第二项为辐射压力对应于传播方向上的力。第三项是由空间极化梯度的存在产生的力(图3(a))。

对于碳纳米管、纳米线、石墨烯等一维微纳材料或二维微纳材料, 物体不再满足偶极子近似。这时, 作用于质心上的光子力, 大小与电磁场本身动量变化率相等、方向相反^[19-23]。因此, 作用力可由穿过围绕物体闭合曲面的光动量通量积分求得^[24, 25]:

$$F = \int_S \langle T_M \rangle \cdot dS, \quad (4)$$

其中 T_M 是麦克斯韦应力张量, 表示电磁场力与机械动量之间的相互作用, 可由散射场求得^[20, 21]。

最基本的激光微纳操控可由光镊实现。在最简单的配置中(图3(b)), 可以通过使用高数值孔径(NA)物镜将激光束聚焦到衍射极限来实现光镊^[27, 28]。通过物镜进行操作, 可以同时获得聚焦捕获光以及对被捕获物体成像的双重目的。样品通常置于小的微流体腔中, 然后固定在三维空间

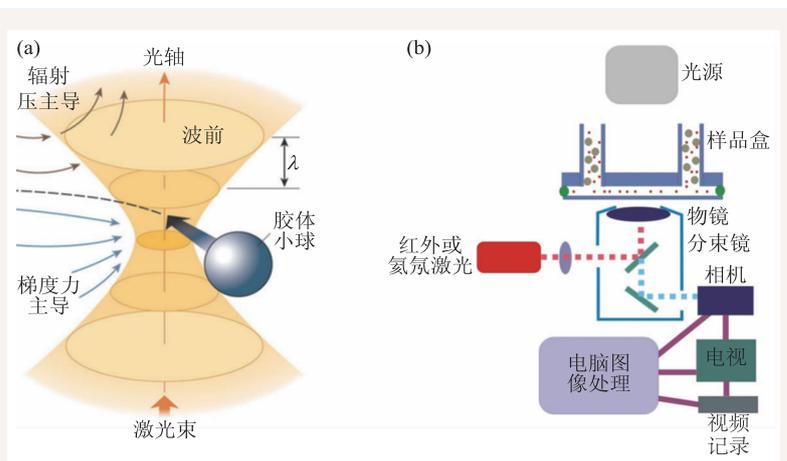


图3 (a)聚焦激光束光场强度和辐射压力空间梯度示意图^[26]; (b)光镊装置示意图

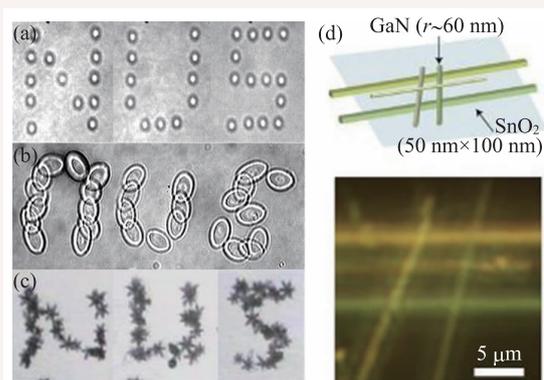


图4 微纳操控制备的微纳材料结构 (a)SiO₂小球; (b)鱼的血细胞; (c)CuS团簇; (d)GaN和SnO₂纳米线^[30]

可控的电动或压电驱动的平台^[29]。通常情况下, 光镊只需要很小的光功率(低至几毫瓦)即可对微米材料进行捕获。物体被捕获之后, 依赖于平台高的空间分辨率(纳米尺度)的移动, 可把捕获的物体放置到任何想要的位置(图4(a)), 从而实现精确操控。位置的操控也可以通过调节两个反射镜的角度, 从而控制聚焦光束的位置来实现。除了微米小球外, 还可以实现对生物细胞、半导体微纳结构, 甚至一维半导体纳米线等物体的操控(图4(b—d))。

基于光镊对物体的捕获及移动, 可进一步开发光子力显微镜, 提升微纳操控的精度。光子力显微镜是一种基于光镊的扫描探针技术(图5)。这个概念最初是在观察被捕获的介电粒子在陷阱中的布朗运动如何被探针—样品相互作用所影响时开发的^[31]。通过光子力显微镜, 可以测量低至飞

牛量级的极小力，以及突破光学衍射极限对表面特征进行成像。

被捕获粒子随热波动的运动可以通过过阻尼的朗之万方程在一维方向上描述^[27]：

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\frac{K_x}{\gamma}x(t) + \sqrt{2D}W(t), \quad (5)$$

其中 $x(t)$ 是粒子位置， K_x 是光阱的刚度， γ 是摩擦系数， D 是斯托克斯—爱因斯坦扩散系数， $W(t)$ 是白噪声。

被光捕获的粒子可以作为一种光子力显微镜

探针，用于软结构的成像^[33]。与原子力显微镜悬臂的刚度($10-10^5$ pN/nm)相比，光捕获的刚度更低($10^{-3}-1$ pN/nm)^[34]。此外，通过这种方法，还可以实现快速的三维成像，采样速率达到几万千赫兹采样率)。在高位置敏感性和低弹簧常数的共同作用下，这种光子力探针可以达到几个飞牛的高分辨率，远远超过其他扫描探针技术^[34]。因为空间分辨率方面受到物体粒径和热波动的影响较大，使用一维纳米结构作为探针有助于提高空间分辨率，它们纳米尺度的横向尺寸和微米尺度的长度可以在非常低的激光功率下实现稳定的光镊效果，同时保持高的横向分辨率。基于铈酸钾纳米线或聚合物纳米纤维等纳米材料制备的纳米级光源，甚至可以实现亚波长的光子力显微镜。在一维或二维微纳结构的情况下，例如碳纳米管、纳米线、石墨烯或其他二维晶体，降低的对称性意味着光学扭矩的存在，也就是光子力中包含着角度的信息，因此材料的操控对光束传播或偏振方向极其敏感。特别是在一维微纳结构中，长度是调节光子力、扭矩和流体动力的关键参数。

3 激光微纳加工

在光镊设备的基础上，通过增加聚焦激光束的能量密度，可以对微纳材料进行破坏性的操作，若可以对这种操作实施精密控制，则可以利用其实现激光微纳加工。

在初期的研究当中，这种微纳加工技术被广泛地应用在碳纳米管阵列的图案化制备^[35](图6(a))。根据被加工材料的光吸收系数，可以采用不同波长的激光光源。在高倍物镜的帮助下，激光束可以很好地聚焦在材料表面，空间分辨率通常为亚微米。图案化的制备可以通过编程控制位移台的移动来实现，也

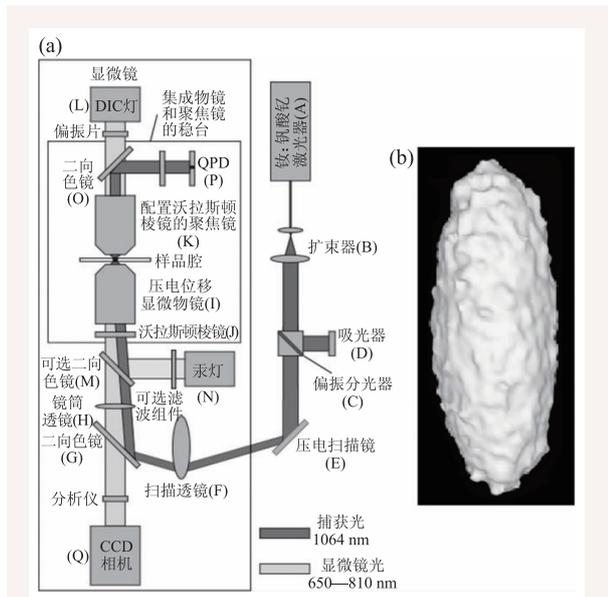


图5 光子力显微镜 (a)光子力显微镜结构示意图；(b)基于光子力显微镜成的3D图像^[32]

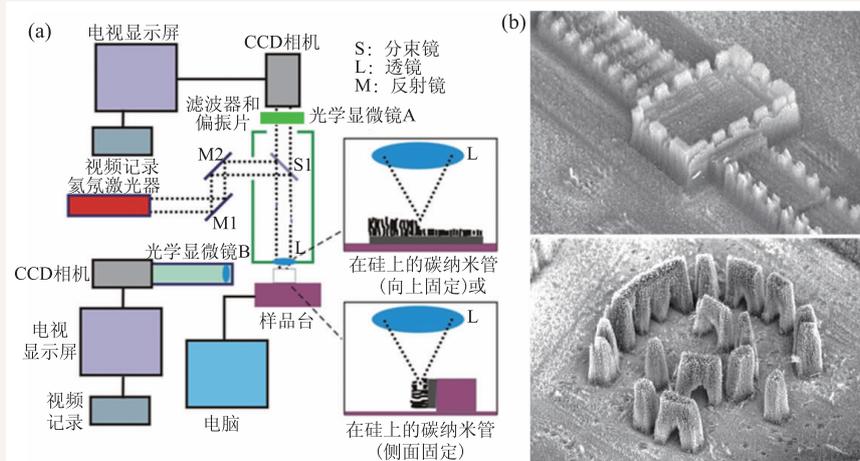


图6 激光微纳加工技术 (a)装备示意图^[35]；(b)在碳纳米管阵列上的三维微纳加工

可以通过控制激光束的扫描来实现。当激光束聚焦在碳纳米管阵列上时，碳纳米管吸收光子能量，并转化为局部热能，在0.1 s内温度可从室温上升到2500 K左右^[36]，从而导致碳纳米管升华。加工过程可采用CCD相机对图像进行采集，并对激光加工过程进行监控，从而直接检测微纳结构的质量。在一般的二维图案化的基础上，通过控制激光焦点在 z 方向的位置，也可实现三维微纳加工，更复杂的三维结构则可以通过使用垂直和侧向剪枝方法的组合来制备(图6(b))。除碳纳米管外，基于聚焦激光束的微纳加工还普遍地应用于其他一维微纳材料阵列，如硅纳米线^[37]、氧化铜纳米线^[38]、二硒化锗纳米线^[39]等。

在此技术模型的基础上，衍生出更为先进的激光直写技术，被广泛地应用于各种制造领域。然而，其空间分辨率受到经典光学理论衍射极限的限制以及光热扩散效应的影响，难以达到纳米精度。直到飞秒脉冲激光器的出现，不仅仅促进了人们对物质中各种超快过程的认知，也为微纳加工技术的进步提供了更多的可能性。利用超快脉冲激光进行微纳加工，有效地集中能量密度，并极大程度地避免热扩散效应，从而突破衍射极限的限制。尤其是近年来快速发展的飞秒脉冲多光子微纳加工技术，利用多光子效应和激光与物质相互作用的阈值效应，成功地达到了纳米尺度的空间分辨率。我国在飞秒脉冲激光微纳加工处于世界领先地位，2001年，清华大学孙洪波教授在日本工作期间利用800 nm波长的飞秒激光制备了标志性的“纳米牛”(图7(a))^[40]，首次在实验上突破了光学衍射的极限，实现了120 nm的空间分辨率。后期我国科学家获得了十几纳米尺度的空间分辨率(图7(b))^[41]。该技术可以拓展为多光束并行加工技术，从而实现大批量微纳结构阵列式快速加工(图7(c))^[42]，为后期光学器件的发展如光子晶体、超结构、超表面的制备提供了技术支持。

随着对激光与微纳材料相互作用机理、微纳加工技术以及相关材料技术的深入研究，激光微纳加工在各种微尺度光机电器件中展示出广阔的

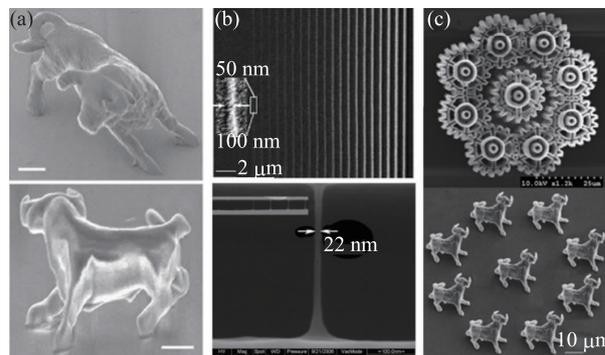


图7 高分辨率激光微纳加工技术 (a)双光子激光微纳加工制备纳米牛^[40]；(b)纳米线^[41]；(c)多光束方法制备齿轮结构和纳米牛阵列^[42]

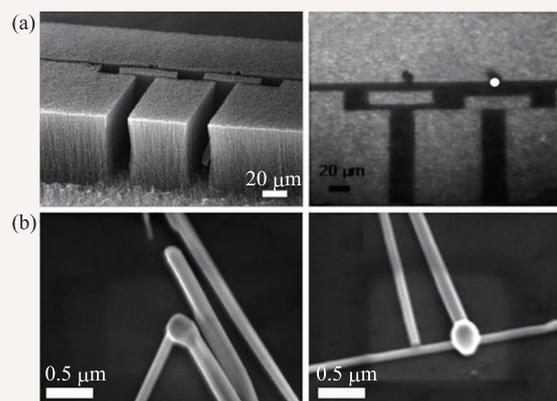


图8 激光微纳制备与焊接 (a)在碳纳米管阵列上实现的激光加工以及操纵的逻辑电路^[43]；(b)激光焊接氧化铜纳米线^[38]

应用前景。例如，利用激光微纳加工，可在碳纳米管阵列上制备光驱制动器，基于两个光驱制动器开关组合，可以形成逻辑电路(图8(a))^[43]。光驱制动器从制备到控制都由聚焦激光束来实现。通过激光微纳加工制备开关型结构，成型之后，当激光束照射在开关旁边时，光子力可推动开关连通，达到“开”的状态；激光束关闭时，开关断开，达到“关”的状态，两个光驱开关组合，则可以实现“与”“或”门逻辑电路。

除了破坏性的微纳加工之外，聚焦激光束还可以进行修复性微纳加工，例如激光微纳焊接。图8(b)展示了对氧化铜纳米线的焊接^[38]，将聚焦激光束照射到两根单独的氧化铜纳米线的交叉点上，高能激光束可以融化纳米线，使交叉处相互融合，关闭激光后两根纳米线快速冷却并连接到一起。

4 激光微纳改性

激光与微纳材料的相互作用是一个复杂的过程，根据激光波长、脉冲长度、能量大小以及材料的化学成分、形貌、化学计量的不同，能够引起各种各样的作用，包括光热效应、光化学反应、光破坏、光相变、光物理改性等。在微电子器件多功能集成化需求的引导下，灵活调控微纳材料的性质变得尤为重要，因此人们对激光微纳加工提出了更高的要求，在微纳加工的基础上，可以同步地对材料的性质进行调控，即激光微纳改性。促成激光改性实现的形式有很多种，总体上可以分为通过改变物理形貌实现和通过化学反应实现2种类型。激光的高能量密度使得很多在常温常压下不易发生的化学反应通过光化学反应的形式实现，从而诱导改性。以硫硒化镉这种三元化合物为例，激光微纳加工不仅仅可以在材料

上制备微纳结构，也可以同时改变硫和硒的摩尔比例，从而实现光学性质的调控(图9(a))^[44]。硫硒化镉是一种直接带隙半导体，具有很强的荧光发光效率，发光波长取决于禁带宽度。硫硒化镉的禁带宽度由硫和硒的摩尔比例决定，可从硫化镉的带宽2.4 eV连续调节到硒化镉的带宽1.7 eV(图9(b))^[45]，荧光颜色依次由绿光转变为黄、橙光，直至红光。因此，通过激光微纳改性技术，可在同一硫硒化镉材料上，实现多色微区荧光图案化(图9(a))。在空气或者富氧环境中进行激光微纳加工，通过对激光参数的精确控制，可以诱导可控的光氧化反应，得到空间尺寸可控、氧化程度可控、性质可调的微纳结构。以黑磷这种近年来被广泛关注的二维晶体材料为例，在富氧环境中对黑磷实施激光微纳加工，可在被加工区域促发光氧化反应，生成氧化黑磷。通过施加不同的激光功率，可以控制黑磷的氧化程度，从而调控材料的禁带宽度，进而实现多色光致发光(图9(c))^[46]。类似的光氧化反应诱导的激光微纳改性可应用于多孔硅纳米线阵列，改性后，形成的多孔氧化硅纳米线可在蓝光区域发光，由于激光微纳改性并没有明显的改变硅纳米线的形貌，因而可以拓展光学加密的应用。激光改性区域为信息加密区域，因为形貌未改变，因此在自然光观察下，没有信息可以显示，而在紫外光照射下，写入的信息可以通过光致发光读取。

材料的形貌和厚度对微纳材料的性质起着决定性影响。对于二维微纳材料，材料的性质随着层数的变化而变化。尤其是对以二硫化钼和二硫化钨为代表的过渡金属硫族化合物，随着厚度逐渐减薄至单层，材料由间接带隙半导体转变为直接带隙半导体。利用激光微纳加工，可以对多层二硫化钼实施激光逐层减薄，因此可以通过激光控制层数的方式，实现激光微纳改性，这种方式没有化学反应的参与，属于物理改性。当激光聚焦于多层二硫化钼表面，材料吸收光子能量并转化为热能，导致局部温度迅速升高，致使上层二硫化钼升华。由于二维材料与衬底之间良好的接触，界面热传导性能好，底层材料吸收光子转换的热能可以很好地通过衬底散发出去，所以即使

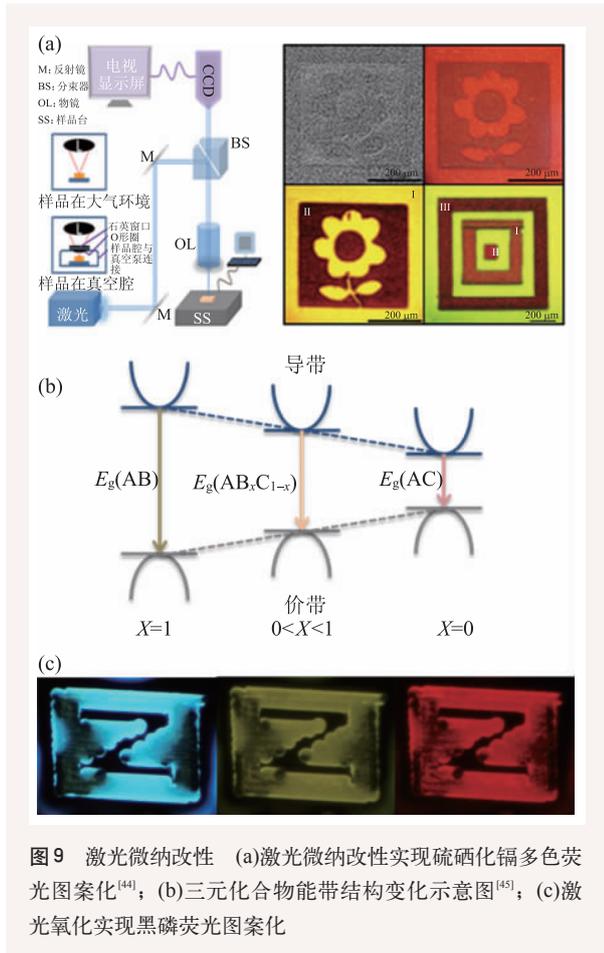


图9 激光微纳改性 (a)激光微纳改性实现硫硒化镉多色荧光图案化^[44]；(b)三元化合物能带结构变化示意图^[45]；(c)激光氧化实现黑磷荧光图案化

提高激光功率，上层二硫化钼升华之后，单层二硫化钼也可以保留在衬底上，实现由多层到单层的制备(图 10(a))^[47]。由于材料类型从间接带隙半导体转变为直接带隙半导体，因此光学性质从无荧光转变为可光致发光，实现了激光微纳改性(图 10(b))^[48]。基于激光微纳加工高空间分辨率的特点，可以在多层薄膜上制备单层微纳结构，以及单层—多层同质结微电子器件。同样的改性方式也可应用到二硫化钨二维晶体上，并实现荧光的图案化(图 10(c))^[49]。

在通过激光物理改性以及光化学反应改性之外，还可以通过激光引入缺陷的方式对微纳材料进行改性。这种改性方式要求对激光功率的控制比较严格，不能对材料造成任何物理形貌的改变。在氧化锌/硒化镉纳米线阵列上实施激光微纳改性时，通过对激光参数的精确控制，可以在保持纳米线形貌不变的情况下，在材料内部引入浅能级缺陷。这些缺陷能级，可以作为激子的非辐射复合中心，增强材料的光致发光效率，使得激光微纳改性的部分比未改性的部分荧光更强。因此，可以通过激光微纳改性技术写入保密信息，用于改性的聚焦激光束既起到改性的作用同时又起到信息写入工具的作用，因写入过程并未改变材料形貌，自然光观察下，读取不出任何有效信息，在紫外光照射下，写入信息区域比未写入区域具有更强的荧光强度，因而可以有效地读取出入信息，从而实现光学信息加密(图 10(d))^[50]。光学信息加密直写也可在二维晶体单层二硫化钨上实现。不同于在氧化锌/硒化镉纳米线中激光改性的作用机理，在单层二硫化钨中，激光微纳改性的实现源于缺陷的修复。通过化学气相沉淀法生长的单层二硫化钨中，不可避免地存在大量硫空位缺陷，这些缺陷以非辐射复合中心的形式存在，极大地降低了材料的光致发光效率。当在

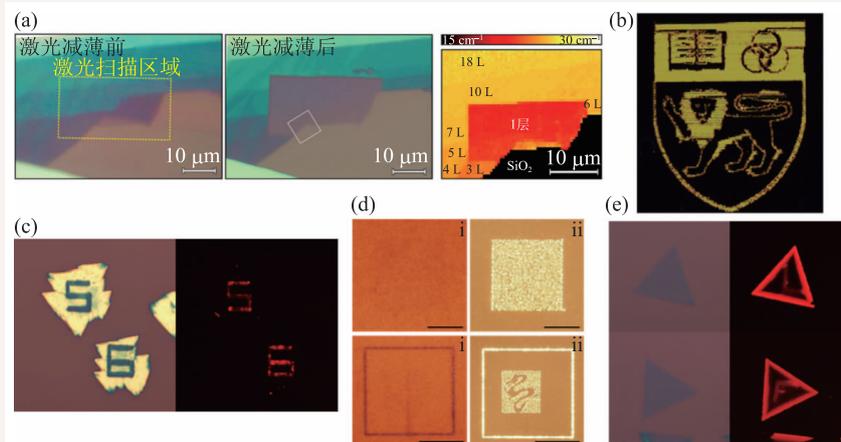


图 10 激光微纳改性与加密直写 (a)二硫化钼激光微纳减薄^[47]；(b)二硫化钼激光图案化制备^[48]；(c)二硫化钨荧光图案化^[49]；(d)在氧化锌/硒化镉纳米线阵列上的激光加密直写^[50]；(e)在单层二硫化钨上的激光加密直写^[49]

富氧环境中对单层二硫化钨进行激光微纳加工时，氧原子可在高能激光的驱动下，填补到硫空位中，对空位缺陷进行修复。修复后禁带中的缺陷能级消失，从而提高了材料的光致发光效率。类似地，此类型的激光微纳改性并未改变材料的形貌，因而可以通过在自然光和紫外光照射下的区别，读取出聚焦激光束写入的信息，实现光学信息加密(图 10(e))^[49]。

5 展望

在信息量爆炸式发展的后摩尔时代，支撑信息电子器件的半导体材料向深度摩尔化甚至超越摩尔化发展，纳米级小尺寸材料将会发挥越来越重要的作用。在此背景下，对纳米结构的激光微纳精确操控、加工以及改性是实现纳米器件甚至生物分子组装、表征和光学控制的有效技术手段和有力保障。如文中所述，在这个方向上已经取得了相当大的进展，例如实现了对零维材料的精确操控，对一维、二维材料的微纳加工和微纳改性。在这个基础上，期望获得更高分辨率与更高灵敏度的聚焦激光技术，用以支持更加精细、精准的操作和表征，例如对单个分子进行光谱分析的技术、对多个纳米颗粒相干操控以及纠缠控制、纳米粒子的激光冷却和量子态操控等等，从而促进量子计算的发展。

要实现上述目标, 需要开发新的激光技术。目前尚有下列几个技术瓶颈需要解决: 激光微纳操控期望达到亚纳米级, 以便用于深度摩尔化电子器件的制备; 除了技术上的提升以外, 对操控和加工过程中光与物质相互作用机理的研究十分重要, 对作用机理的深入了解, 可以对技术方案的最优化提供保证; 有必要开发快速扫描和多光

束并行技术, 以达到高产量和低成本的生产。我们相信, 聚焦激光技术的应用范围远远超过文中所总结的例子, 激光技术与微纳材料的相互作用, 尚有巨大的应用潜力有待开发, 在未来信息技术的快速发展中, 激光微纳技术毫无疑问将发挥重要的作用。

参考文献

- [1] Poynting J H, Strutt J W. *Philos. Trans. R. Soc. London*, 1884, 175:343
- [2] Lebedew P. *Annalen der Physik*, 1901, 311:433
- [3] Nichols E F, Hull G F. *Physical Review (Series I)*, 1901, 13:307
- [4] Ashkin A. *Physical Review Letters*, 1970, 25:1321
- [5] Ashkin A. *Physical Review Letters*, 1970, 24:156
- [6] Leibfried D, Blatt R, Monroe C *et al.* *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75:281
- [7] Cohen-Tannoudji C N. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70:707
- [8] Chu S. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70:685
- [9] Phillips W D. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70:721
- [10] Dholakia K, Čížmár T. *Nature Photonics*, 2011, 5:335
- [11] Padgett M, Bowman R. *Nature Photonics*, 2011, 5:343
- [12] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E *et al.* *Opt. Lett.*, 1986, 11:288
- [13] Gordon J P. *Phys. Rev. A*, 1973, 8:14
- [14] Goncharenko A V, Semenov Y G, Venger E F. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16:517
- [15] Volpe G, Helden L, Brettschneider T *et al.* *Physical Review Letters*, 2010, 104:170602
- [16] Maragò O M, Jones P H, Gucciaridi P G *et al.* *Nature Nanotechnology*, 2013, 8:807
- [17] Draine B T. *The Astrophysical Journal*, 1988, 333:848
- [18] Albaladejo S, Marqués M I, Laroche M *et al.* *Physical Review Letters*, 2009, 102:113602
- [19] Shepelevich N V, Prostackova I V, Lopatin V N. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2001, 70:375
- [20] Borghese F, Denti P, Saija R. *Scattering from Model Nonspherical Particles: Theory and Applications to Environmental Physics*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2003. 95
- [21] Pfeifer R N C, Nieminen T A, Heckenberg N R *et al.* *Reviews of Modern Physics*, 2007, 79:1197
- [22] Patti F, Saija R, Denti P *et al.* *Scientific Reports*, 2019, 9:29
- [23] Borghese F, Denti P, Saija R *et al.* *Opt. Express*, 2007, 15:11984
- [24] Mishchenko M I. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2001, 70:811
- [25] Swartzlander Jr G A, Peterson T J, Artusio-Glimpse A B *et al.* *Nature Photonics*, 2010, 5:48
- [26] Grier D G. *Nature*, 2003, 424:810
- [27] Neuman K C, Block S M. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, 75:2787
- [28] Appleyard D C, Vandermeulen K Y, Lee H *et al.* *Am. J. Phys.*, 2007, 75:5
- [29] Lee W M, Reece P J, Marchington R F *et al.* *Nature Protocols*, 2007, 2:3226
- [30] Pauzuskie P J, Radenovic A, Trepagnier E *et al.* *Nature Materials*, 2006, 5:97
- [31] Ghislain L P, Webb W W. *Opt. Lett.*, 1993, 18:1678
- [32] Pralle A, Florin E L, Stelzer E H K *et al.* *Single Molecules*, 2000, 1:129
- [33] Rohrbach A, Tischer C, Neumayer D *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, 75:2197
- [34] Neuman K C, Nagy A. *Nature Methods*, 2008, 5:491
- [35] Lim K Y, Sow C H, Lin J *et al.* *Advanced Materials*, 2003, 15:300
- [36] Lim Z H, Lee A, Lim K Y Y *et al.* *Journal of Applied Physics*, 2010, 107:064319
- [37] Choi Y R, Zheng M, Bai F *et al.* *Scientific Reports*, 2014, 4:4940
- [38] Yu T *et al.* *Nanotechnology*, 2005, 16:1238
- [39] Mukherjee B, Murali G, Lim S X *et al.* *RSC Advances*, 2014, 4:10013
- [40] Kawata S, Sun H B, Tanaka T *et al.* *Nature*, 2001, 412:697
- [41] Tan D, Li Y, Qi F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90:071106
- [42] Dong X Z, Zhao Z S, Duan X M *et al.* *Applied Physics Letters*, 2007, 91:124103
- [43] Lim Z H, Sow C H. *Adv. Funct. Mater.*, 2010, 20:847
- [44] Lu J, Lim X, Zheng M *et al.* *ACS Nano*, 2012, 6:8298
- [45] Lu J, Liu H, Zhang X *et al.* *Nanoscale*, 2018, 10:17456
- [46] Lu J *et al.* *ACS Nano*, 2015, 9:10411
- [47] Castellanos-Gomez A, Barkelid M, Goossens A M *et al.* *Nano Letters*, 2012, 12:3187
- [48] Lu J, Lu J H, Liu H *et al.* *ACS Nano*, 2014, 8:6334
- [49] Venkatakrishnan A, Chua H, Tan P *et al.* *ACS Nano*, 2017, 11:713
- [50] Lu J, Liu H, Zheng M *et al.* *Scientific Reports*, 2014, 4:6350