

等离子光热与宏观形变实现光纤拉锥

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/23065.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

等离子光热与宏观形变实现光纤拉锥。微纳光纤是直径接近或者小于导波波长的一维光波导，具有小尺寸、大表面体积比、强倏逝波传输特性等特点，使它们对外界环境表现出高灵敏、快响应速度和较低的探测极限等优势，常被用作研究近场光学、量子光学、高精度传感的重要工具。

在制备层面，微纳光纤一般可由标准光纤(直径 $>100\ \mu\text{m}$)经过火焰加热、位移台拉伸制备得到，最终呈现为由标准光纤(standard fibre)、腰区(waist region)以及过渡区(taper transition)构成的双锥形结构(图1)，制备此类光纤的工艺过程也叫做光纤拉锥。

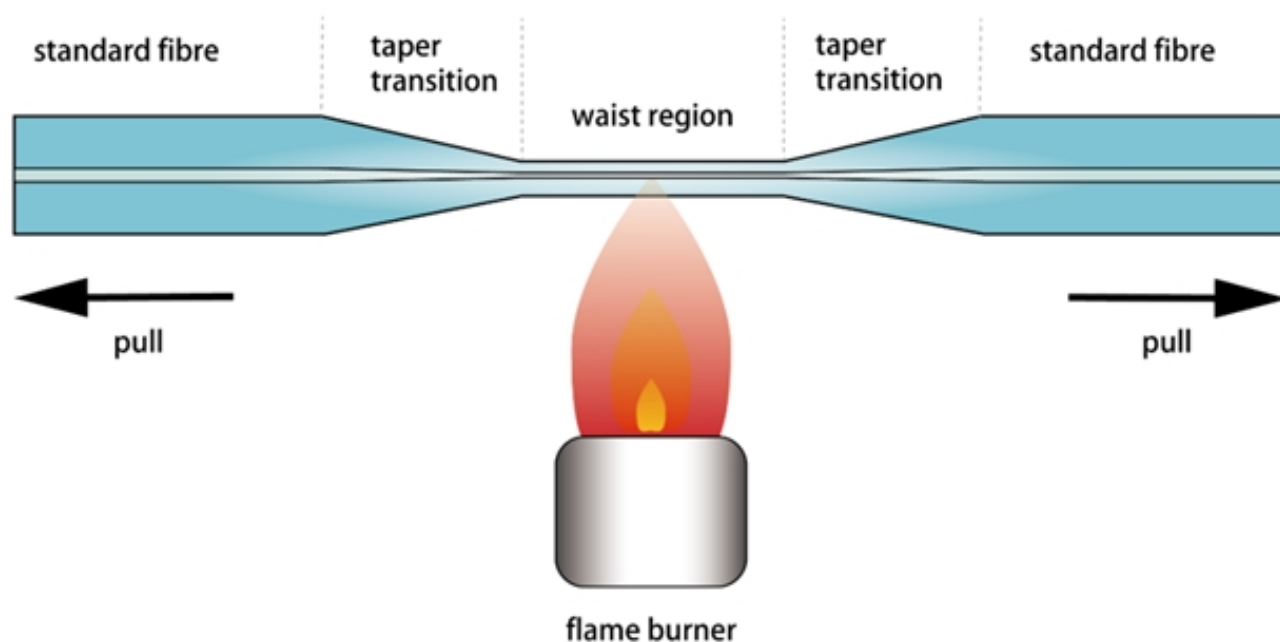


图1：火焰拉伸法制备双锥形微纳光纤

为了将标准光纤拉细至微纳光纤，发生形变区域的光纤需要由硬变软，否则直接拉伸会导致光纤脆断。因此，在光纤拉锥过程中，加热区的温度需要达到二氧化硅的玻璃化转变温度以上、光纤由玻璃态转为粘流态后再通过位移台施加拉力，产生形变。其关键在于，热源与拉力(heat and

pull)的控制。

相应的例子包括1992年Birks等人提出的火焰刷技术，即通过控制火焰燃烧嘴相对于缓慢拉伸的光纤的运动来实现可控形貌的光纤拉锥。后续的创新还包括使用电加热器、高功率CO₂激光器加热方法等来改善气流扰动、燃烧嘴惯性和实现控温加热。

除了上述的方案外，要提供光纤拉锥的热源和拉力二要素，还可以在传统思维框架外寻找答案。

近日，西湖大学仇旻教授课题组报道了利用金属微米片的等离激元效应和在整根光纤中的宏观预制形变分别提供热源与拉力，进而实现光纤自拉锥的技术。该技术未使用火焰、加热器等大尺寸的热源，以及从外部提供拉力的位移台，其紧凑和真空兼容的实验系统可被转移至扫描电子显微镜中，从而实现光纤拉锥过程在纳米分辨率下的原位观测和原位控制，同时该系统也示范了一种基于微纳光纤对光热效应进行原位研究的实验方法。在理论层面，研究人员利用了光热耦合和结构力学的仿真手段阐述了这项光纤拉锥技术中热源与拉力的产生机制。

该成果以Fibre Tapering Using Plasmonic Microheaters and Deformation-Induced Pull发表在Light: Advanced Manufacturing。

如图2A所示，电镜中光纤原位拉锥的实验装置主体包括(1)一根通过传统火焰拉伸方式预拉锥的微米光纤;以及(2)转移至预拉锥光纤腰区的金微米片。该预拉锥光纤的标准光纤区域进一步通过光纤真空法兰连接电镜外的激光器。此外，该拉制过程也可在空气环境中进行。

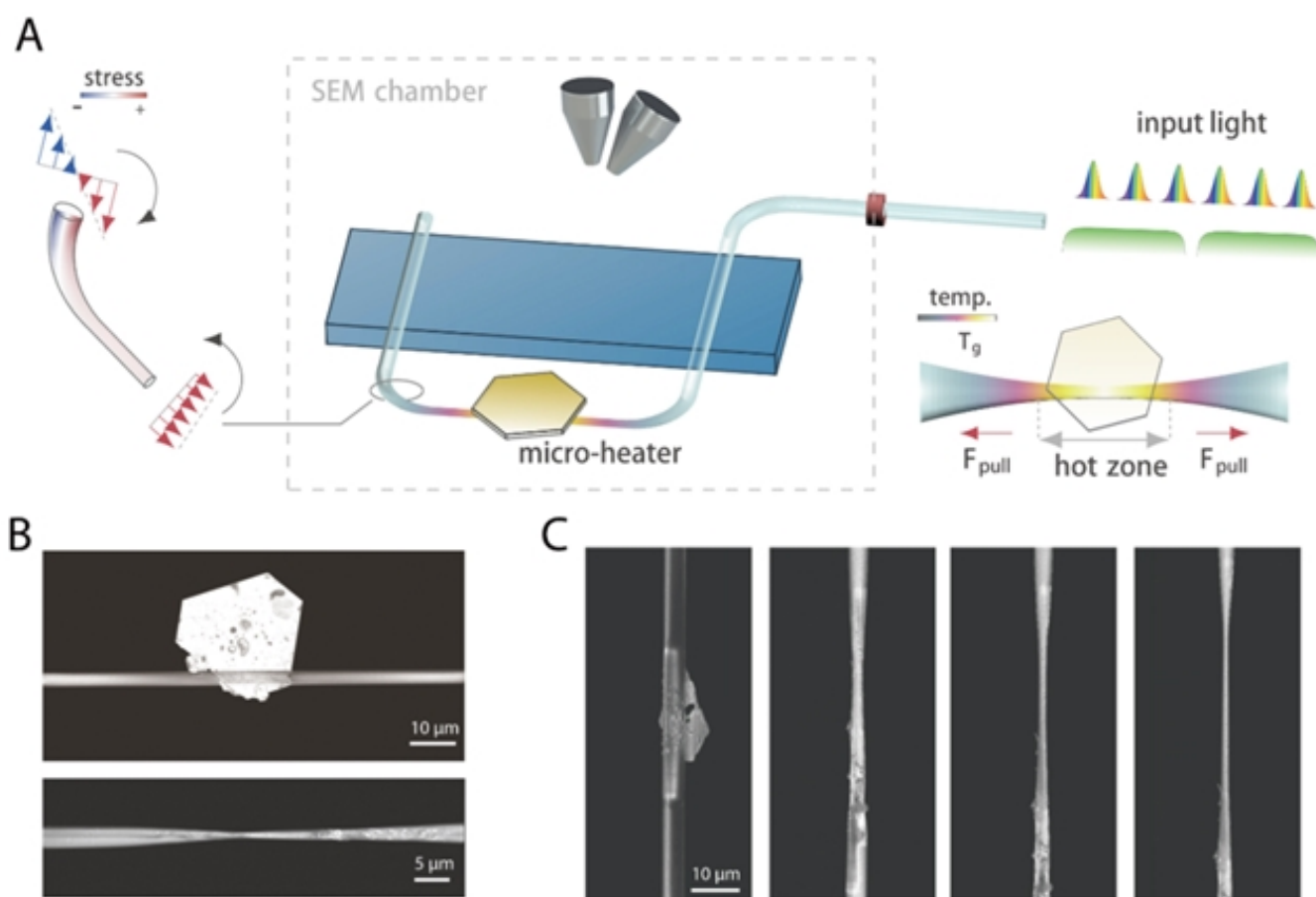


图2：扫描电镜腔室内的原位光纤拉锥实验。(A)实验装置示意图(B)微米光纤拉锥前后对比(C)调节光源开关控制的动态拉锥进程。

当通入激光后，微米光纤的倏逝场与金微米片发生相互作用，在特定波长范围可激发出表面等离激元模式(SPPs)，从而表现出强的光吸收作用和光热效应。在金微米片中产生的热量主要通过热传导方式传递给微米光纤，因此提供了将光纤加热至玻璃化转变温度(T_g)以上所必须的热源。实验完成后，发生烧蚀的微米片可以用金属剥离液或超声方式去除。对于另一要素拉力，实验过程中，预拉锥光纤被弯折为门字形结构并固定在刚性衬底上，在金属片所处的区域，光纤的轴向应力状态为拉应力，从而在受热软化后自发向两侧拉伸并形成双锥形结构(图2B);当撤回热源，微米光纤温度降至玻璃化转变温度(T_g)以下，拉锥过程停止。由于该系统的紧凑性与真空兼容的特点，可利用扫描电镜对该微纳尺度的拉锥过程进行实时监控(图2C)。

光热耦合仿真可得到由等离激元微米片加热的微米光纤的温度分布，如图3A所示。其中，高于玻璃化转变温度的光纤长度在微米量级，尺寸远小于火焰或常规加热器的加热范围。此外，研究人员发现，当使用连续光激光器和高重复频率(100 kHz)脉冲激光器时，可以在平均输入功率为毫瓦量级时达到温度阈值(T_g);而当使用低重复频率脉冲激光器时，由于脉冲间隔时间变长，无法出现如图3B所示的脉冲间热累积，因此无法观测到金片的热损伤或光纤的软化。

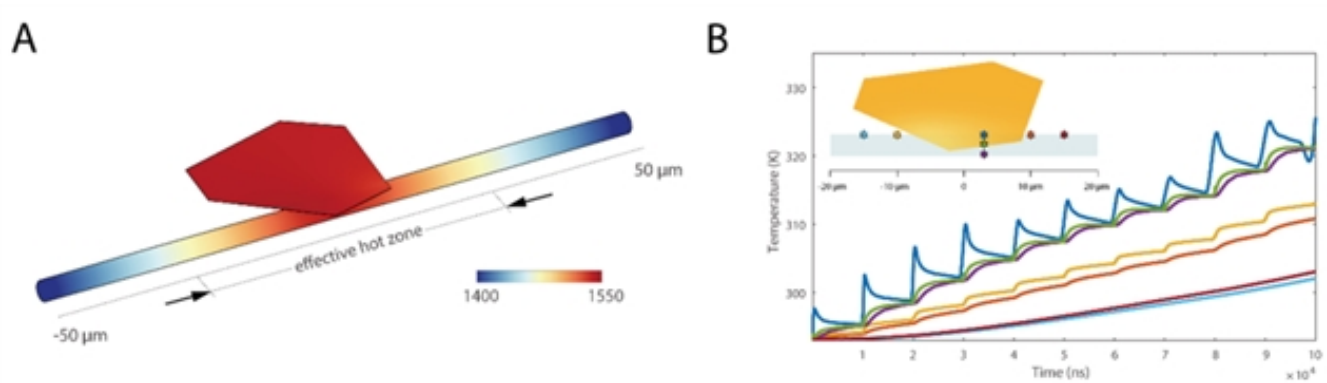


图3：微米光纤-金片的光热转换以及热传导过程。(A)连续激光加热，体系达到稳态后的温度分布。有效加热区(effective hot zone)标记为温度超过玻璃化转变温度的区域。(B)重复频率为100kHz的超连续激光加热形成的脉冲间热累积。

在拉力的产生方面，如图4A所示，门字形弯折的微米光纤需要实现被固定的弯曲端(截面1)与自由悬空的平直端(截面2)之间的弯矩平衡，在平直端，也就是放置微米片的位置需要处于拉应力状态，区别于弯曲端截面的凸侧受拉和凹侧受压。当平直端由于微米片的光热作用被加热至软化温度时，微米光纤会发生平直端的自拉伸和弯曲端的自回复(弯曲半径变大)来释放其内部应力(图4B)，从而在无需外部拉伸系统的情况下实现光纤的自拉锥。

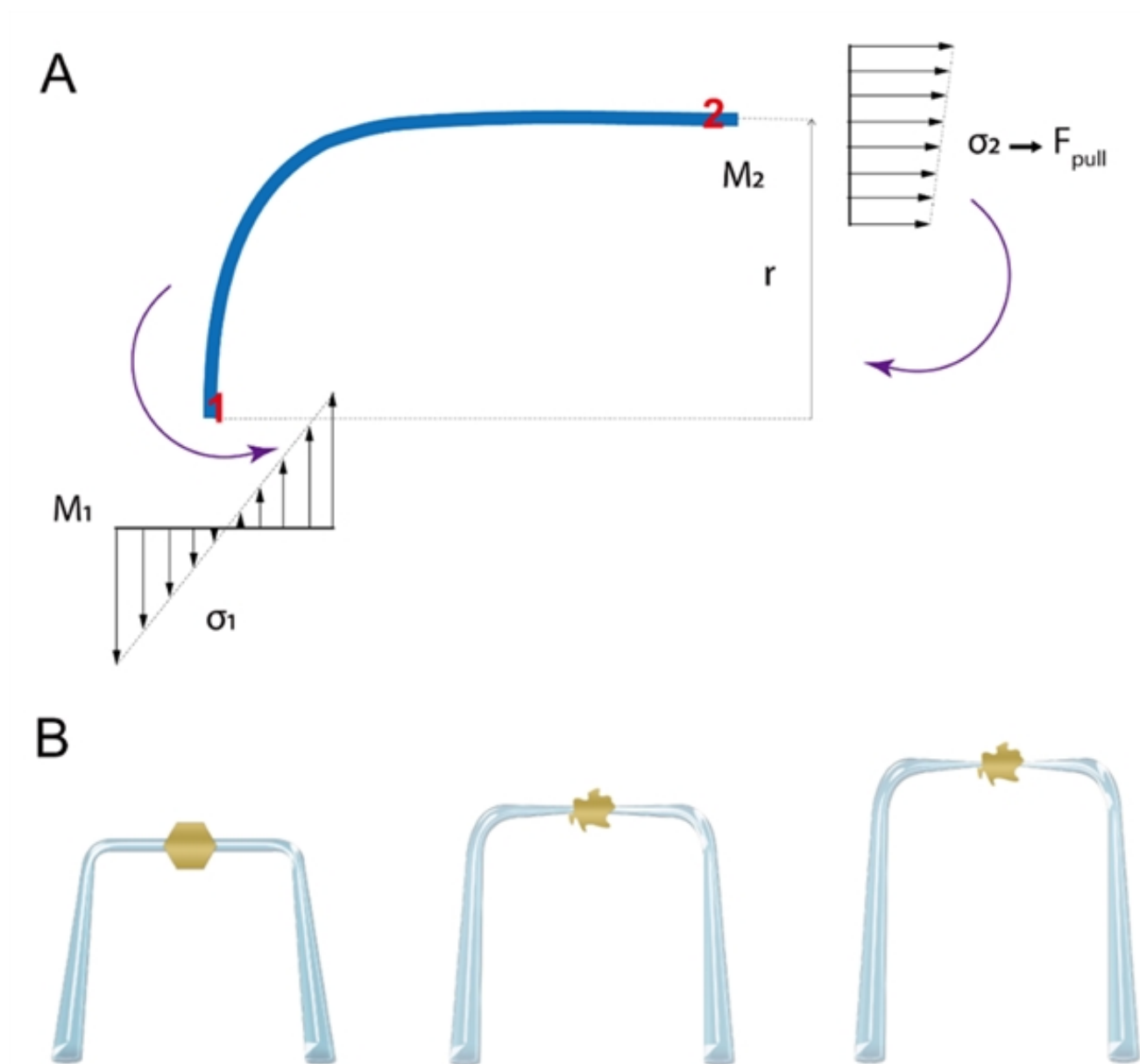


图4：门字形弯折光纤中拉力的产生机制。(A)满足截面1与2弯矩平衡产生的应力状态。(B)光纤在平直端受热软化后的自拉锥过程。

总结与展望

这项新型光纤拉锥技术创造性地利用等离子激光热效应与材料的宏观形变提供高温和拉伸条件，实现了在扫描电镜中的原位光纤拉锥，并建立了光-热-力相耦合的理论模型，为微纳尺度下光与物质相互作用的原位研究提供了范例。

考虑到实际操作的成本与难度，其在实验设计和理论分析的创新性与启发性大于器件加工制备的实用性。未来，提高拉伸应力的可控性与热源的可调节性是将此项技术突破实用性瓶颈的关键难题。

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2023.005>

(来源：先进制造微信公众号)

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性;如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任;作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：仇旻等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发