基于新型空芯光纤的5-10 μm超快激光传输与应用

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41391.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！

基于新型空芯光纤的5-10 μm超快激光传输与应用。 导读

近期，中国科学院西安光学精密机械研究所郭海涛研究员团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Tellurite Anti-Resonant Hollow-Core Fibre: Fabrication, Mid-Infrared Femtosecond Laser Transmission, and Application in Tissue Ablation的研究论文。

该研究提出了一种基于碲酸盐玻璃的新型反谐振空芯光纤，用以解决传统实芯光纤在传输5－10 μm超快激光时因材料非线性、激光损伤阈值低、红外吸收强等材料因素导致脉冲畸变和频域展宽的难题。基于该光纤，研究团队系统性研究了其结构参数与理论性能，展示了该新型光纤的制造流程与性能测试结果。以自搭建的OPA系统为中红外飞秒激光源，展示了通过新型空芯光纤传输5－10 μm超快激光的频域和时域变化，证实其能低损耗高保真传输中红外超快激光。基于该光纤传输的5.75 μm超快激光进一步实现了特定生物组织的高效消融，表明其在医疗激光手术领域巨大的应用前景。

超快激光因其高时间分辨率和峰值功率的特性而成为众多领域的关键工具，尤其是可观测到大量分子特征吸收峰的5－10 μm波段。5-10 μm超快激光独特的指纹特征特性，使其在生物医学领域、原子分子尺度材料表征领域、气体检测领域具有多样化应用，然而，缺乏能在不改变激光特性前提下实现柔性传输的激光波导介质，仍是制约其商业化的关键因素。

基于传统实芯结构的多种红外玻璃光纤可在5-10 μm波长范围内工作。然而材料本征的非线性效应、激光损伤阈值、红外透明能力等特性，使得红外玻璃实芯光纤在传输超快中红外激光时面临挑战。

反共振空心光纤（AR-HCFs）是目前传输超快激光的理想介质。通过反谐振反射效应，AR-HCFs能将超过99.9%的激光能量限制在空气芯内传播，从而具备低非线性、低色散、低延迟及高损伤阈值等诸多优势。通过包层结构设计可使高阶模独立泄漏，从而实现具有大模场面积的单模传输。此外，空芯设计还便于气体注入，使AR-HCFs支持非线性研究、气体传感及产生气体激光。然而，石英AR-HCF在中红外区域（尤其是波长超过5 μm时）会因石英玻璃材料损耗高导致光纤损耗增加，因而亟需开发新型AR-HCF。

基于碲酸盐玻璃制造AR-HCF是一种有效途径，该材料在中红外波段具有比石英玻璃更低的材料损耗，可进一步拓宽AR-HCF透射带宽。相较于其他红外玻璃，碲酸盐玻璃具备更高的激光损伤阈值、强抗水蚀性能及更优异的化学稳定性。目前基于碲酸盐玻璃的AR-HCF研究报道较少，主要挑战在于碲酸盐玻璃在玻璃化转变温度附近会发生剧烈的粘度变化，这使得碲酸盐AR-

HCF的拉丝工艺变得复杂。此外，碲酸盐AR-HCF的性能特征也尚未得到充分研究。

该研究团队首先仿真研究了碲酸盐AR-HCF的理论性能，研究光纤在每个波长下的最优损耗表现，结果表明单层6毛细管结构碲酸盐AR-HCF的理论损耗性能可达10 μm波长处1 dB/m，这一损耗值与现有同波长下可用的红外玻璃实芯光纤损耗水平相当。所设计的光纤结构与理论性能仿真结果如图1所示。

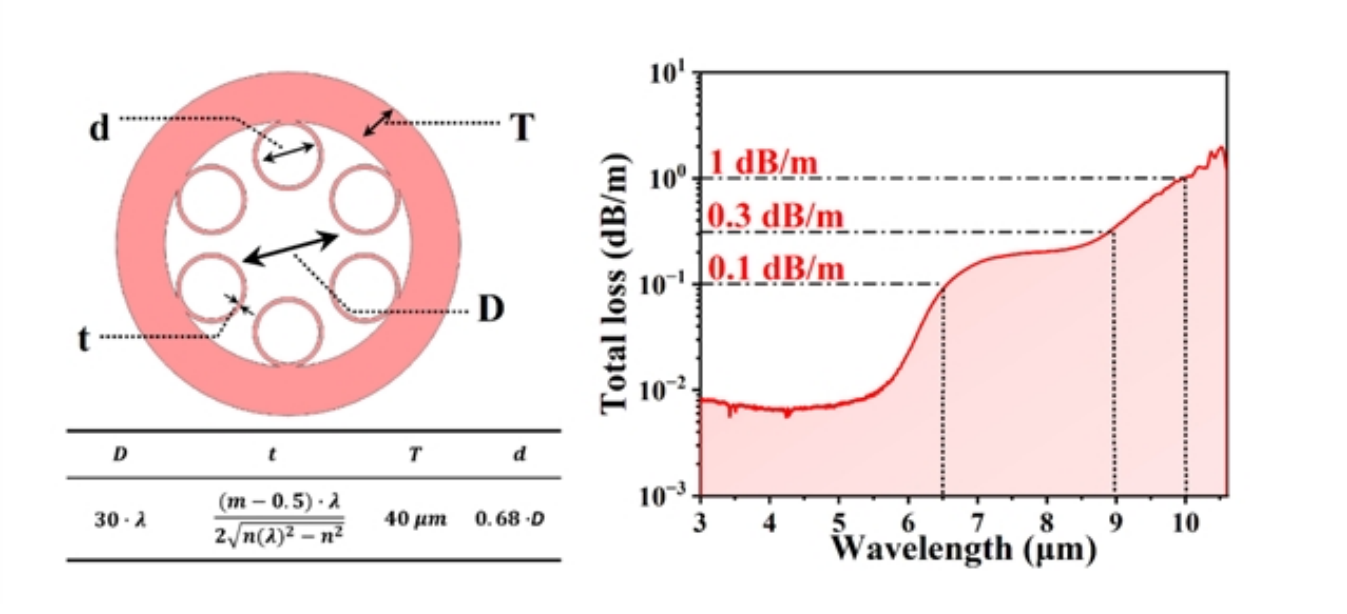


图1：碲酸盐AR-HCF结构示意图与光纤性能仿真

之后研究团队展示了碲酸盐AR-HCF的实验制备流程，通过堆叠法制备光纤预制棒，通过精密的气压控制技术实现了光纤结构保持，其实验室制备结构稳定的光纤长度可达30 m以上。碲酸盐AR-HCF的制备流程与光纤截面如图2所示。

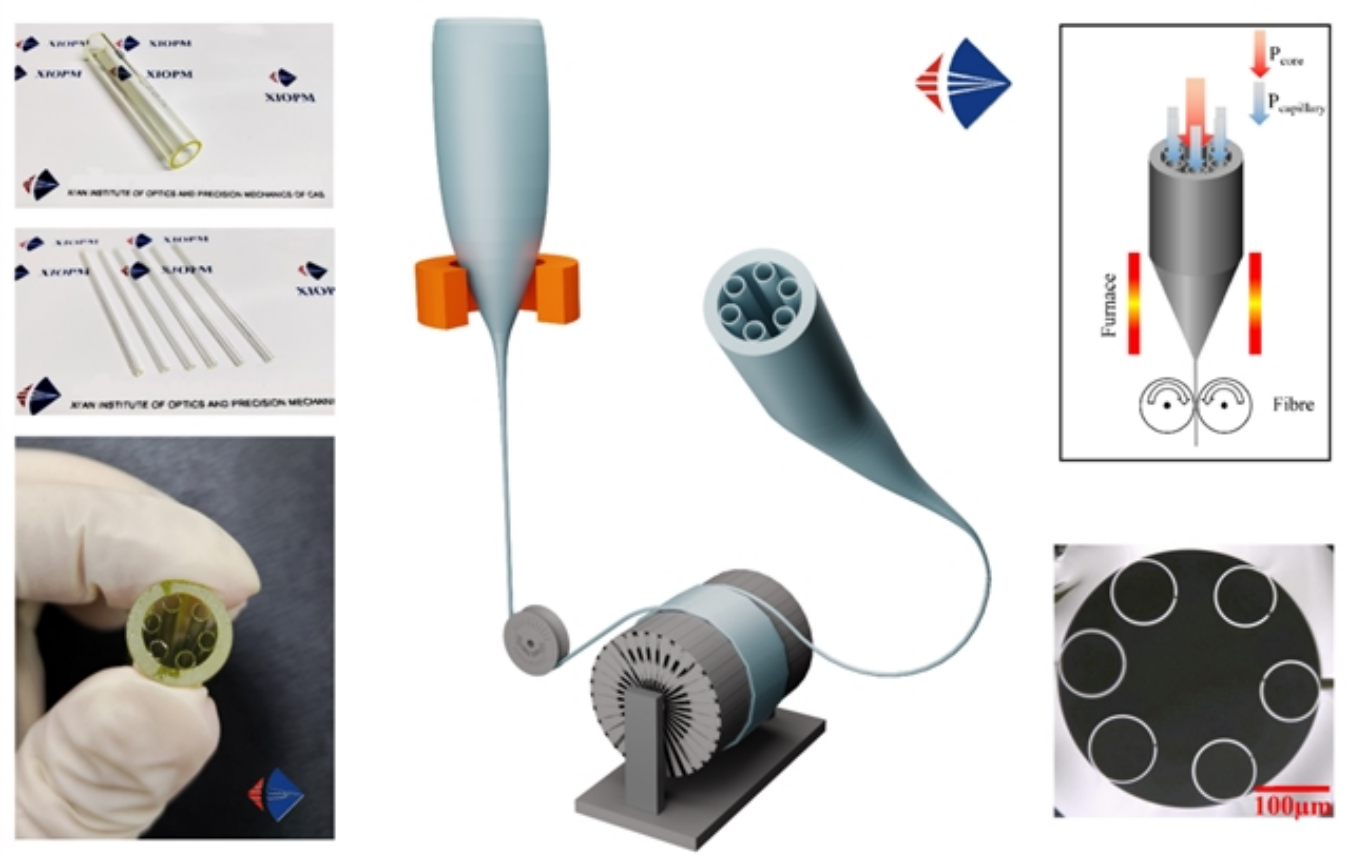


图2：碲酸盐AR-HCF制备流程与光纤截面

以自搭建的光学参量放大器产生的中红外飞秒激光为光源，研究团队研究了碲酸盐AR-HCF传输5－10 μm飞秒激光的结果，如图3所示，证实其激光传输波长窗口可达10 μm，从输入输出激光的光谱对比来看，经该光纤传输后未出现光谱展宽现象；从时域特征对比来看，光源脉宽为229 fs，光纤输出激光脉宽为240 fs，其轻微展宽为ZnSe聚焦透镜所致，碲酸盐AR-HCF本身未对激光时域特征产生影响；从光束质量来看，经光纤传输后激光质量获得了提高，可见其对传输激光存在模式提纯作用。

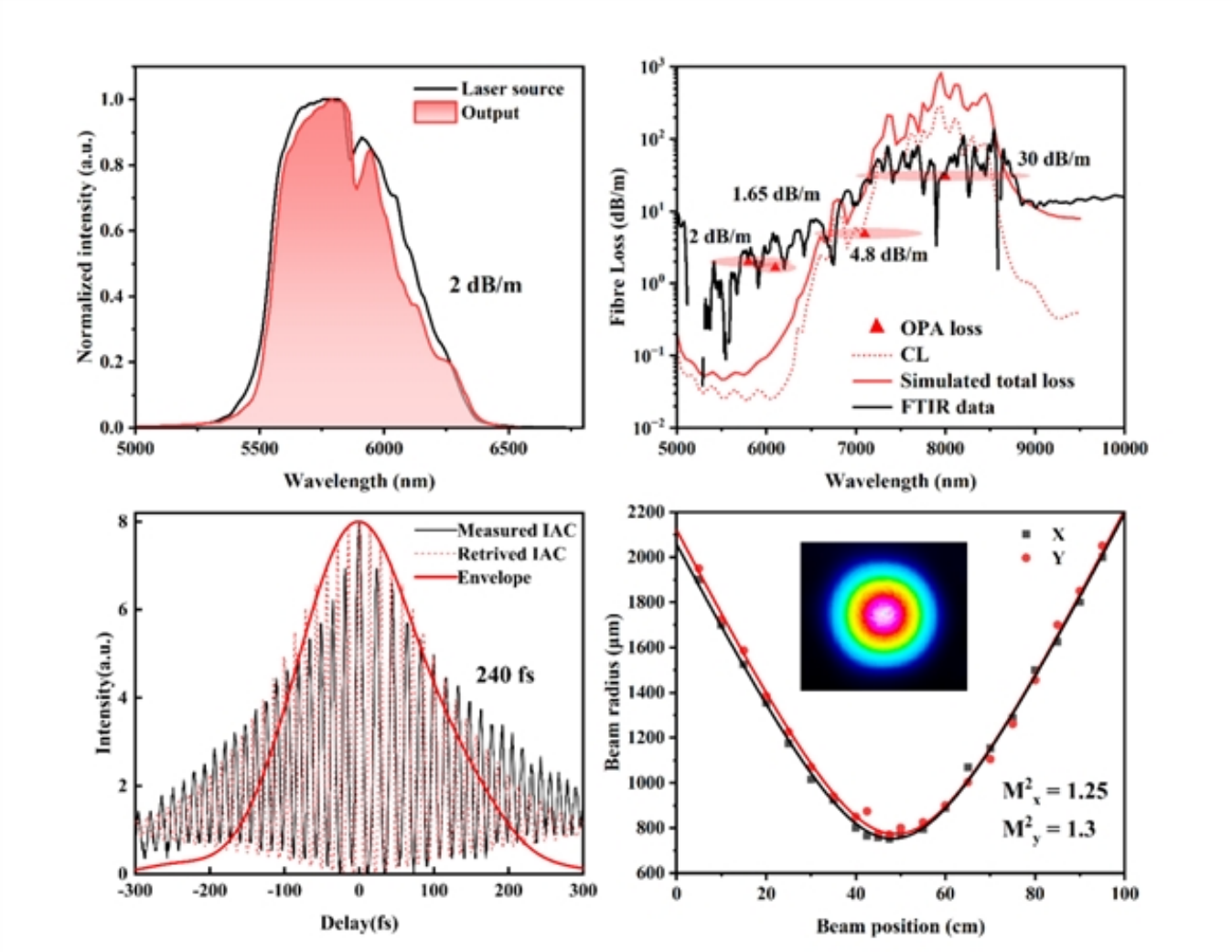


图3：碲酸盐AR-HCF输出中红外飞秒激光的频域、损耗、时域和光束质量特征

最后，研究人员还基于碲酸盐AR-HCF传输的5.75 μm飞秒研究了其对特定生物组织的消融效果。由于该光纤对传输激光存在提高光束质量作用，这优化了能量分布，仅需40 mW平均功率即可实现样品消融，这比使用空间光路聚焦的功率阈值降低了50%。更重要的是光纤本身具备柔性导光能力，这使得使用5－10
μm飞秒激光实现生物体内如血管介入式激光手术成为可能，如图4所示。

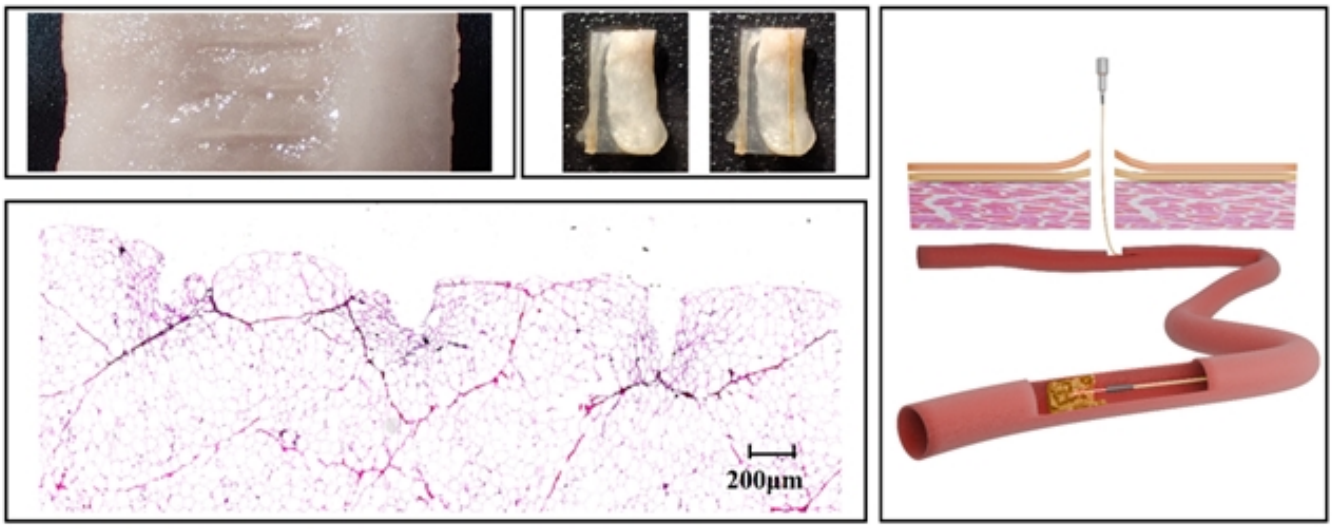


图4：基于碲酸盐AR-HCF传输5.75 μm飞秒激光实现特定生物组织的高效消融

总结与展望

该研究从碲酸盐AR-HCF的设计与制备出发，实现了中红外超快激光的高质量高保真传输，生物组织消融实验进一步证实了中红外飞秒激光用于生物体内激光手术的可行性。光源－光纤相互配合，共同发展，相信在不远的将来，具有更低损耗的新型碲酸盐AR-HCF将在医疗手术领域、激光科研领域、气体传感领域发挥巨大的作用。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.032

作者：郭海涛等 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转发