
千万级品质因子！全光纤微环谐振腔实现跨越式发展

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41261.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！

千万级品质因子！全光纤微环谐振腔实现跨越式发展。 导读

尽管由普通光纤拉锥而成的微光纤波导已被广泛应用于各类光学细分领域，但基于微光纤的谐振腔结构却长期得不到重视。根本原因在于传统微光纤谐振腔的性能表现并不理想，很多时候甚至被认为是低品质因子（Q值）的代名词，虽然具有全光纤兼容、可柔性封装的特色，却并不能胜任对性能要求更高的场景。许多人悲观地认为相关制备过程是完全不可控的，故而微光纤谐振器的Q值很难得到进一步提升。

近日，南京大学现代工程与应用科学学院徐飞教授、丁梓轩副研究员团队通过对微光纤力学性能与耦合区精细调控等问题的长期跟踪和系统性研究，建立了超高Q值微光纤结形谐振器的制备模型，突破了微光纤谐振腔数十年来的Q值瓶颈，实现了最高达 3.9×10^7 的创纪录Q值，较传统水平提升3个数量级，表明微光纤谐振腔具备迈向亿量级及以上更高性能的潜力。该研究将开启超高Q微光纤谐振腔时代，为更精密、高效的微光纤导波光子学器件奠定了基础。

相关研究成果以Microfiber knot resonator with 107Q-factor record 为题发表在《Light: Science Applications》上，南京大学现代工程与应用科学学院的徐飞教授为论文通讯作者，博士生周新新和副研究员丁梓轩为共同第一作者。

研究背景

作为基础光学器件，高Q值光学谐振器能显著增强光与物质的相互作用，是非线性光学、量子物理、高灵敏度传感及其他领域科学突破的核心支撑。微球、微柱等回音壁模式（WGM）微腔因其Q值可高达 10^9 甚至更高，长期以来备受关注。虽然这类独立式回音壁模式微腔具备优异的光学性能，但其在机械稳定性、集成度及封装方面仍面临实际挑战。此外，随着微加工技术与半导体工艺的发展，片上波导微腔凭借尺寸紧凑、与其他光子器件集成度高的优势，逐渐成为极具潜力的技术方向，但Q值往往由于刻蚀工艺被限制在 10^6 以下。

与此同时，基于微光纤波导的谐振器作为一种补充平台，展现出了独特的优势。这类微光纤谐振器与全光纤系统完美兼容，能够实现低耦合损耗和简易封装。与体块或片上WGM微腔不同，微光纤谐振器采用机械束缚耦合和自支撑波导几何结构，兼具柔性与韧性，使其能应用于可穿戴健康监测与水声传感等新兴领域。通过扫火法制备技术可实现超低损耗与表面光滑的微光纤，利用这种微光纤制备的谐振器Q值上限理论上可达 10^{11} 以上。然而，由于长期以来对该器件的制备工

艺缺乏系统性的研究，从未形成标准化的工艺流程和规范，实验报道的微光纤谐振器Q值长期徘徊在104~105区间。这导致学界普遍认为其Q值存在固有局限，制约了其在更高要求光学场景中的应用。

创新研究

研究团队首次针对微光纤结谐振器（MKR）长期存在的Q值瓶颈展开系统研究，明确并量化了微光纤力学性能与结区精细耦合控制这两大核心限制因素。论文中推导了实现超高Q值的最优耦合参数条件，揭示了环境温湿度对微光纤机械稳定性的影响。基于这些认知，开发了环境定制化制备流程，将MKR的Q值提升至 3.9×10^7 ，较传统水平提升近3个数量级。制备的超高Q值微光纤结谐振器（UHQ-MKR）展现出热双稳特性与清晰的偏振特征，且其在全光纤激光系统中实现单频运转的应用也得到验证，进一步凸显了Q值突破107量级的价值。

微光纤结谐振器的结构及Q值表征

该研究成功制备出超高Q值微光纤结谐振器（UHQ-MKR），其结构如图1a所示，由单根微光纤巧妙缠绕而成，兼具结构稳定性与光学性能优势。实验中所制备的MKR器件Q值最高可达 3.9×10^7 ，与已有微光纤谐振器相比，该工作不仅Q值创下新高，其精细度也提升约30倍，标志着微光纤谐振器正式迈入千万级Q值时代。

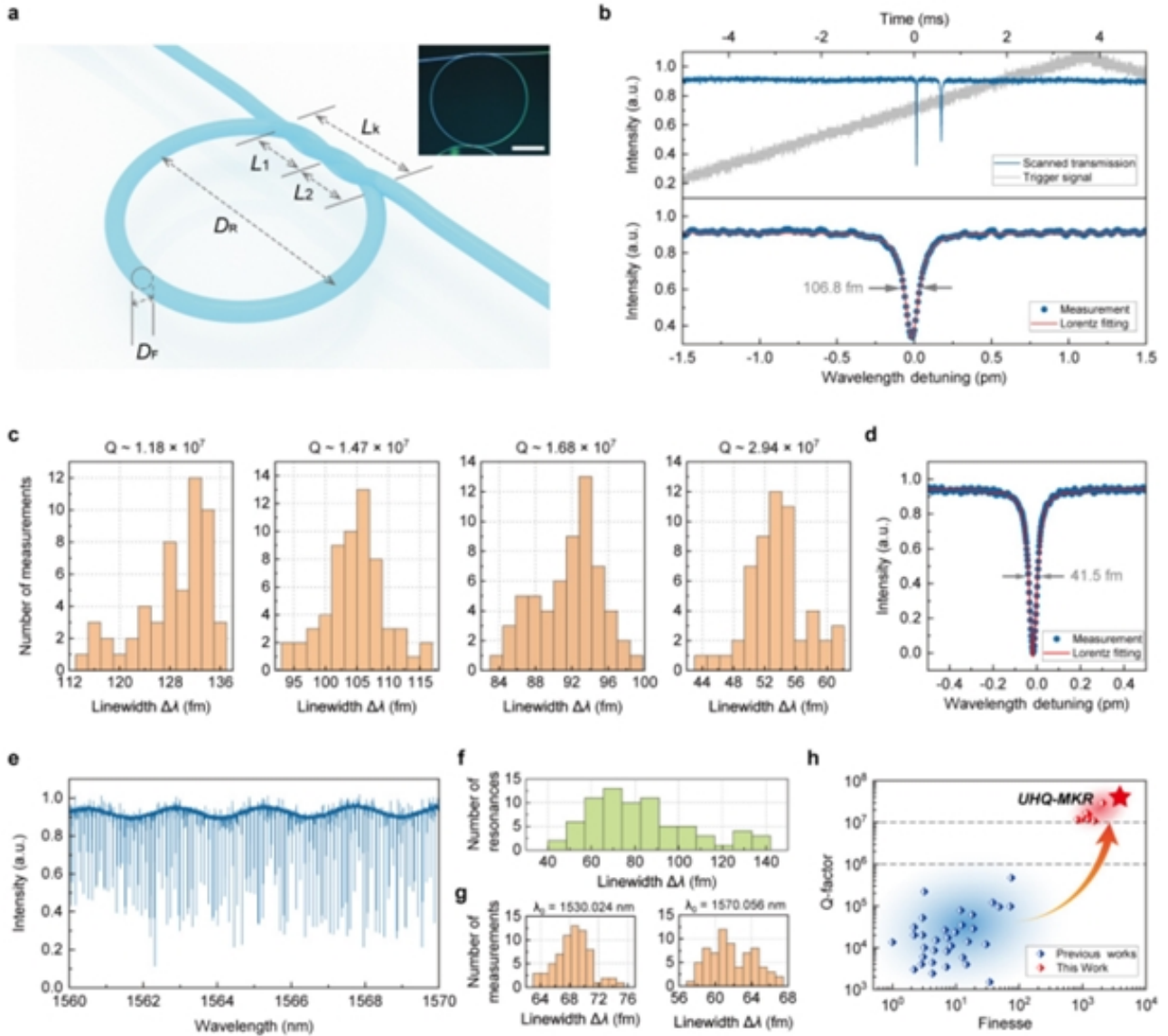


图1. 超高Q值微光纤结谐振器 (UHQ-MKR) 的表征

微光纤的质量调控

微光纤的质量管控是实现UHQ-MKR的关键前提。该研究采用氢氧焰扫火法制备微光纤。研究表明，环境温湿度会直接影响热场分布、火焰稳定性及光纤熔融过程，进而改变微光纤的力学性能，最终决定MKR的Q值。该研究通过系统优化确立了器件的最优制备环境：一是将石英光纤精准置于氢氧焰焰芯区特定位置，以平衡熔融状态、减少内应力与表面缺陷；二是保持湿度恒定，从而稳定热场，避免因热场波动导致微光纤内部非对称应力结构。

MKR的耦合调谐

在获得高质量微光纤的基础上，该工作进一步通过精细耦合调谐实现UHQ-MKR。实验表明，通过调控结区耦合长度，谐振峰线宽呈现周期性波动，存在一系列高Q值区间（图2a）。此外，MKR的尺寸（以自由光谱范围FSR表征）对Q值也具有重要影响，对于直径为3

μm 的微光纤，FSR小于0.16 nm（约20 GHz）时，更易获得Q值高于 10^6 的器件（图2b）。基于耦合模型的理论分析（图2c-f）与实验验证相结合，该研究明确了微光纤直径、耦合区长度和环形区尺寸之间的最优匹配关系，确立了可控制备UHQ-MKR的关键工艺参数。

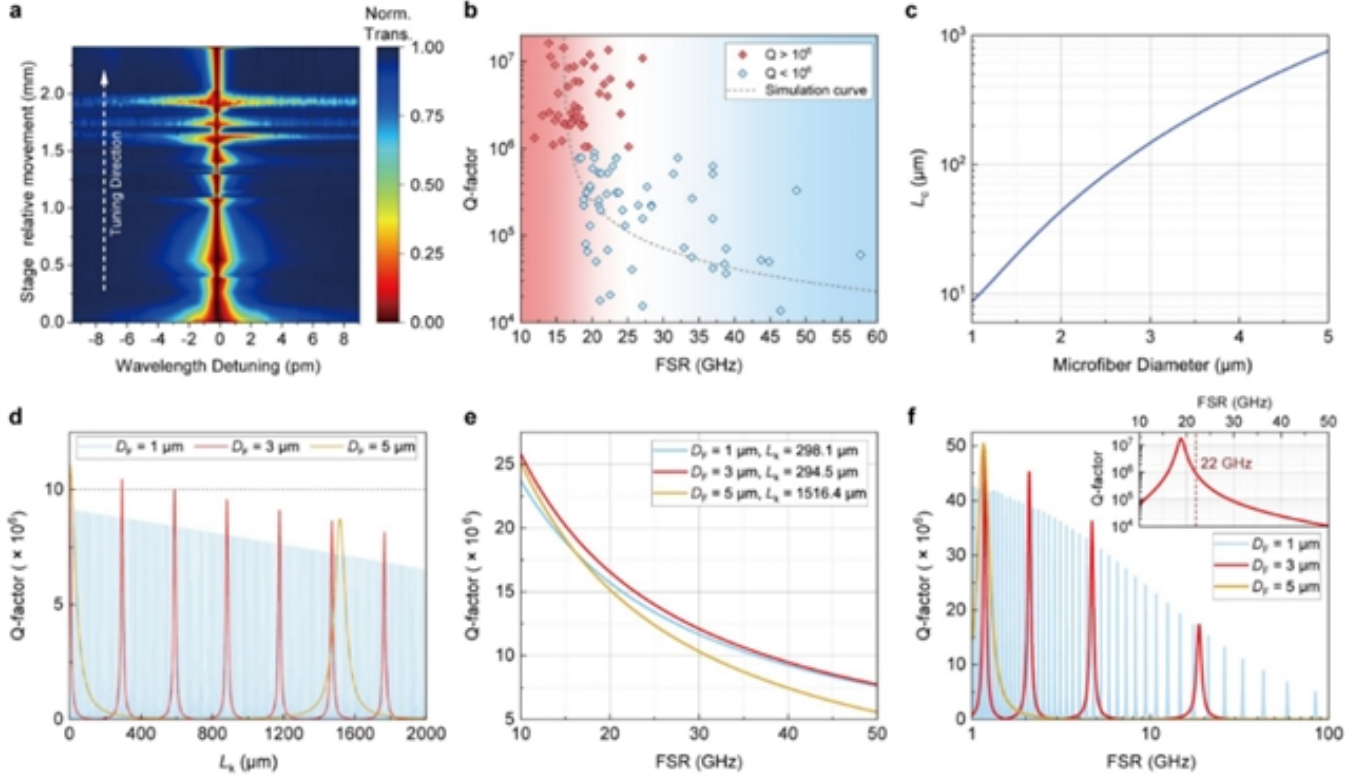


图2. UHQ-MKR的耦合调谐

基于UHQ-MKR的单频光纤激光器

为充分展示UHQ-MKR的实际应用价值，该工作中将Q值超过 1.3×10^7 的器件作为选模元件集成于全光纤激光系统中。实验结果表明，该激光器在1561.148 nm波长处实现了光学信噪比超过52.4 dB的单频输出，实测线宽低至20.26 kHz（图3a）。射频光谱分析进一步证实激光器在0–1 GHz范围内无杂散拍频，表现出纯净的单纵模运转特性（图3b）。作为对比，移去UHQ-MKR后激光器立即呈现多纵模振荡。

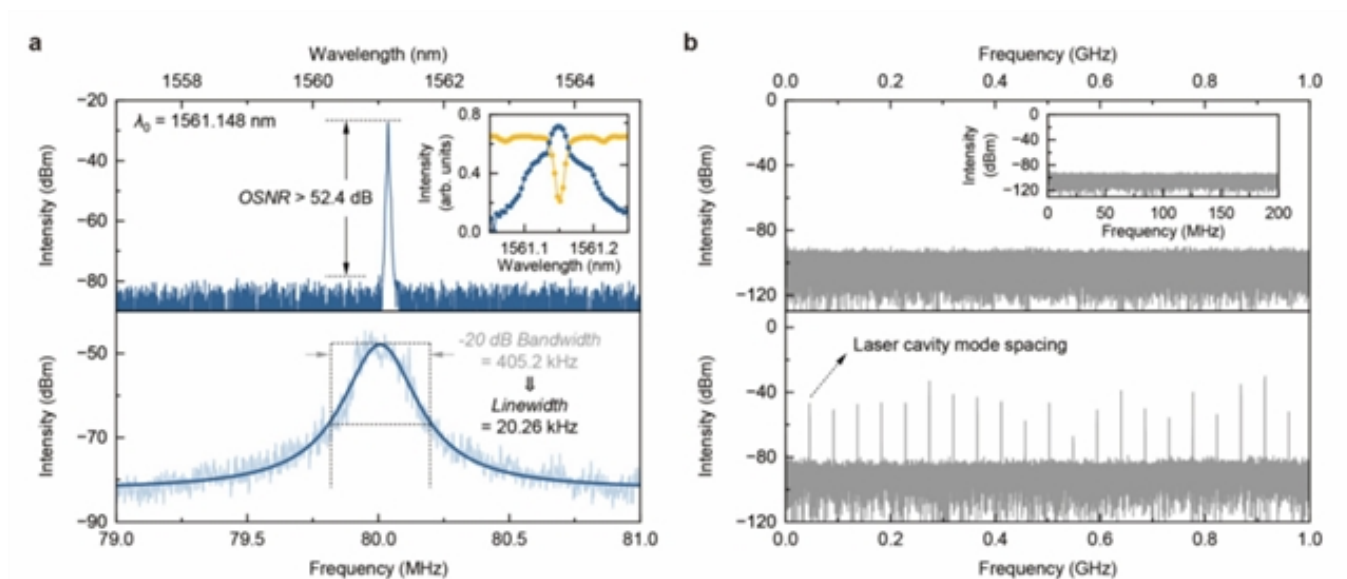


图3. 基于 UHQ-MKR 的光纤激光器单频运转

总结与展望

该研究通过系统优化微光纤力学性能与结区耦合调控，成功开发出超高Q值微光纤谐振器的制备模型，并获得创纪录的超高Q值微光纤结谐振器样品。基于所建立的环境定制化制备流程与耦合理论模型，能够实现可重复的高性能器件制备，并验证了其在窄线宽激光器中的实用价值。该谐振器兼具超高Q值、全光纤兼容与柔性结构等独特优势，为腔增强可穿戴传感、水声学、柔性光机械系统乃至量子态操控等领域的新型器件开发提供了新的低成本、高性能平台。（来源：Light ScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-02124-1>

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：徐飞等 来源：《光：科学与应用》

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