微纳光纤制备方法及其高精度直径控制技术

康仪, 刘可盈, 谢宇, 龚珏, 姚妮, 方伟, 郭欣, 张磊, 王攀, 童利民*

浙江大学光电科学与工程学院, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027

*联系人, E-mail: phytong@zju.edu.cn

收稿日期: 2020-02-04; 接受日期: 2020-03-25; 网络出版日期: 2020-07-10

国家重点研发计划(编号: 2018YFB2200400)、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(编号: 11527901)和中央高校基本科研业务费资助

摘要 微纳光纤具有小尺寸、强光场约束、大比例倏逝场、低传输损耗等特性, 近年来获得广泛关注及应用研究, 其中微纳光纤的制备精度是决定其导波特性和应用性能的关键因素. 本文首先介绍玻璃微纳光纤的高温拉伸制备原理, 接着重点介绍基于火焰加热手持式拉伸、火焰加热机械扫描拉伸、电加热机械扫描拉伸及激光加热机械扫描拉伸的微纳光纤实验制备方法, 分析及比较了四种制备方法的优缺点. 同时, 简要介绍了聚合物微纳光纤的制备方法. 然后, 详细介绍了基于高阶模截止的直径反馈控制原理、控制技术及纳米级直径控制精度的制备系统, 以及微纳光纤的在线直径测量方法. 最后, 简要总结微纳光纤制备方面的已有进展, 并探讨进一步研究方向.

关键词 微纳光纤, 精确制备, 直径控制

PACS: 42.70.Ce, 42.81.-i, 42.81.Bm, 42.81.Cn, 42.81.Dp

1 引言

微纳光纤作为光学波导, 有着诸多优越的光学和材料特性, 比如传输损耗低、光场约束能力强、倏逝场比例高、表面场增强效应显著、波导色散大范围可调、制备过程可控、结构均匀性好、机械性能高及生物兼容性好等^[1,2]. 近年来, 微纳光纤在光学近场耦合、传感检测、原子光学、光力操控、光通信、光纤激光技术及非线性光学等领域获得广泛关注及应用^[3-11]. 比如, 利用微纳光纤的强约束大比例倏逝波传输光场, 可以实现从标准光纤(或自由空间)到纳米结构的高效率、低损耗近场耦合^[12]; 利用微纳光纤表面倏逝场强

度的梯度分布, 可以操控冷原子或纳米颗粒^[13]; 利用较大作用范围的倏逝场(波长量级), 可以灵敏探测周围环境中的多种物理场, 并且可以将信息以光信号的方式实时反馈回微纳光纤^[14,15]. 另外, 由于其大波导色散和对光场的强束缚特性^[1], 微纳光纤可以用于光纤激光器色散调控^[4]、超连续光谱产生^[16,17]及光学倍频^[18,19]、参量四波混频^[20]等非线性光学研究或应用. 上述研究或应用场合均对微纳光纤的结构形貌提出了较高的要求. 一般来说, 对于特定材料的微纳光波导而言, 表面光滑度、结构形貌参数及其均匀度直接影响其传输损耗、倏逝场分布及波导色散等关键特性, 因而深入研究决定微纳光纤结构形貌参数的制备方法非

引用格式: 康仪, 刘可盈, 谢宇, 等. 微纳光纤制备方法及其高精度直径控制技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 084212

Kang Y, Liu K Y, Xie Y, et al. Fabrication methods and high-precision diameter control techniques of optical micro-/nanofibers (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 084212, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0027](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0027)

常重要.

近年来, 微纳光纤制备方法及技术获得了越来越多的研究和关注, 进展迅速. 本文首先简要介绍玻璃微纳光纤的拉制原理, 接着, 详细综述微纳光纤的典型制备方法和实验系统, 分析讨论其优缺点及应用范围. 同时, 对于非玻璃类微纳光纤的制备做简要介绍. 然后, 重点介绍最近在微纳光纤制备中发展起来的直径高精度控制技术及其实验进展, 以及几种在线直径测量方法. 最后, 总结已有进展, 并探讨微纳光纤制备技术的未来发展方向.

2 玻璃微纳光纤的高温拉伸制备原理

目前典型的微纳光纤拉锥过程可根据Birks等人^[21]在1992年提出的拉锥模型来预判. 在该模型中, 假设加热源是“区域均匀热源”, 根据玻璃材料的温度特性, 单模光纤软化温度约为1665°C, 退火温度约为1140°C. 被拉伸的光纤的温度最低要在退火温度以上, 越靠近软化温度, 光纤的黏滞系数越小, 越容易拉伸. 若选择合适的温度, 使用“火焰刷”加热技术, 可控制线性型、指数型、正弦型等各种形貌的微纳光纤.

光纤拉锥的结构形貌如图1所示, 由两个过渡区分别连接腰区(即微纳光纤)和未拉锥的单模光纤. 根据“火焰刷”技术的理论模型, 可以实现光纤拉锥过渡区的变化以及腰区微纳光纤的长度和直径的控制. 腰区长度 l_w , 即光纤被加热拉伸的长度, 可表示为

$$l_w = L_0 + \alpha x, \quad (1)$$

式中, L_0 表示前一次“火焰刷”扫描的腰区长度, x 表示腰区被拉长的长度, 常数 α 是“火焰刷”过程中控制腰区长度 l_w 变化的参数, 且 $\alpha \leq 1$ (因为 $l_w \geq 0$, 故有 $\alpha = dl_w/dx \leq 1$). 由图1可知, z_0 表示过渡区的长度, 则

$$2z_0 + l_w = L_0 + x. \quad (2)$$

公式(2)适用于拉锥过程中的任意两次火焰刷过程. 其中, z 为拉锥腰区半径, $r(z)$ 为拉锥过渡区起始半径, α 为距拉锥过渡区起始处的距离, 为 z 处光纤半径.

假设火焰可以近似为“点加热源”, 快速扫描火焰可以形成区域均匀热源, 那么光纤能被拉锥的加热区域就是火焰与光纤之间的相对扫描长度, 再由质量体积守恒条件和公式(1)以及公式(2)可逐步导出光纤的

形貌表达式. 文献[21]中对此有详细的推导, 这里只给出结论

$$r(z) = r_0 \left[1 + \frac{2\alpha z}{(1-\alpha)L_0} \right]^{-1/2\alpha}. \quad (3)$$

对于不同的 α 参数值, 其形貌示意图如图2所示. 从图2可以看出, α 值越大, 则腰区越长. 特别地, 当 α 分别等于-0.5, 0和0.5时, 过渡区分别为线性、指数和倒数曲线形貌.

对于具有线性形貌的微纳光纤, 其线性锥区结构可用于制备优良的光纤探针, 已经在微纳操作中得到了很多应用; 对于具有指数形貌的微纳光纤, 可以实现传输光场在不同直径光纤之间的绝热变换, 已经在微纳光纤耦合结构及器件、微纳光纤环形谐振腔等方面获得应用; 对于具有正弦形貌的微纳光纤, 可用于微纳光纤长周期光栅等结构.

3 微纳光纤的典型制备方法

3.1 火焰加热拉伸法

玻璃微纳光纤最常用的制备方法是火焰加热拉伸玻璃预制棒(光纤或块体材料), 该方法最早可追溯到19世纪英国科学家Boys^[22]通过拉伸火焰加热的玻璃

图1 光纤拉锥的结构示意图^[21]

Figure 1 The structure of a fiber taper [21].

图2 不同 α 参数下拉锥光纤的形貌示意图^[21]

Figure 2 Schematic diagram of morphology distribution of tapered fibers with different α parameters [21].

矿石, 制备微米直径玻璃细纤的工作. 随着20世纪60年代低损耗玻璃光纤技术的兴起^[23], 作为预制棒的氧化硅玻璃光纤(如无特殊注明, 后文中的玻璃光纤均为氧化硅玻璃光纤)的质量越来越高, 所制备的玻璃微纳光纤的光学质量及结构可控性也得到了很大的提高.

通常, 火焰加热拉伸法可分为手持拉伸和机械扫描拉伸两种方法. 实验室中常用的加热火焰为氢氧焰或丁烷焰^[24,25]. 氢气在空气中燃烧温度最高可达2100°C, 氢氧混合气体燃烧温度更高, 当混合气体中氢气与氧气的化学当量比值为2:1时, 燃烧温度可达2800°C. 同时, 基于电解水制氢的氢气发生器使用安全, 气流纯度和稳定性很好, 适合玻璃微纳光纤的加热拉伸应用. 由于氢氧焰燃烧会产生水蒸气, 在某些应用中, 为消除氢氧根对光纤近红外波段传输损耗的影响, 可使用丁烷焰加热, 其加热温度最高可达1970°C, 完全满足各种玻璃微纳光纤的加热拉伸需求.

3.1.1 火焰加热手持式拉伸法

在对微纳光纤几何参数要求不高的情况下, 手持式火焰加热拉伸是快速制备微纳光纤的简便方法. 在没有氢氧焰的情况下, 可以直接使用一般的酒精灯外焰加热除去涂覆层的标准光纤(图3(a)), 手持光纤两端加热30 s左右, 即可向两边缓慢拉伸光纤, 在中间拉锥区获得微纳光纤. 为增加拉伸过程的稳定性, 也可将光纤两端固定在一维导轨的滑块上^[26], 手持滑块沿导轨向两边拉伸(图3(b)). 使用该方法可以制备直径几百纳米至几微米的微纳光纤, 但是由于火焰加热区的稳定性及拉伸长度难以控制, 腰区直径及拉锥过渡区损耗等随不同拉伸过程而不同, 不确定性较大, 重复性较低, 而且难以拉制直径更小的微纳光纤.

为提高加热区的稳定性, 拉制直径更小的微纳光纤, 2003年Tong等人^[27]提出两步拉伸法(图4), 其一般步骤为: 首先, 使用火焰加热将玻璃光纤拉成微米直径的光纤, 并将其缠绕在一根直径为几百微米的蓝宝石光纤尖端, 使用火焰加热蓝宝石光纤尖端, 使其温度达到玻璃拉伸温度(约1700°C), 利用蓝宝石光纤的热惯性稳定拉伸温度, 然后以1–10 mm/s的速度拉伸光纤, 获得微纳光纤. 使用该方法, 手持式拉伸制备的微纳光纤直径可低至50 nm左右. 此外, 还可以使用拉力自调节拉伸法^[28], 使用手持式火焰加热拉伸制备直径低至20 nm的微纳光纤.

图 3 (网络版彩图) (a) 酒精灯加热手持式光纤拉伸实验照片; (b) 导轨辅助手持火焰加热光纤拉锥装置实验照片^[26]

Figure 3 (Color online) (a) Photograph of a flame-heated hand-held optical fiber stretching process; (b) photograph of a guide-assisted hand-held flame-heated optical fiber taper device [26].

图 4 (网络版彩图) 火焰加热两步拉伸法示意图. (a) 由蓝宝石光纤辅助的火焰加热拉制微纳光纤示意图; (b) 拉制过程的放大示意图^[27]

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of flame-heated two-step stretching method. (a) Schematic diagram of sapphire fiber-assisted flame-heating for drawing micro-/nanofibers; (b) magnified schematic diagram of the drawing process [27].

上述方法均使用标准玻璃光纤作为拉制微纳光纤的预制棒, 限制了微纳光纤的材料选择, 为了拓展材料, 制备功能化微纳光纤, 2006年Tong等人^[29]提出了块状材料局域熔融拉纤法, 如图5所示. 首先, 先用二氧化碳激光或火焰加热一根直径为数百微米的蓝宝石光纤, 在其末端温度达到块状玻璃材料的熔点时与玻璃接触, 局域熔融块状玻璃. 接着, 移开玻璃, 在蓝宝石光纤末端形成一小团熔融玻璃. 然后, 用另一根蓝宝石光纤一端接触熔融玻璃, 等玻璃温度降低到适合拉伸的程度, 以0.1–1 m/s的速度拉开两根蓝宝石光纤, 即可在其末端获得相应玻璃的微纳光纤. 该方法的优点是, 免去制备光纤预制棒的复杂过程, 可直接对各种掺杂、低熔点及红外玻璃进行区熔拉纤, 制备有源、非线性及红外微纳光纤.

通过上述几种手持式火焰加热制备方法, 可以在较大直径范围内快速拉制出表面粗糙度低、机械强度高、传输损耗小的微纳光纤, 如图6所示^[28]. 然而, 由于缺乏对拉伸参数(如拉力、速度等)的精确控制, 制备的微纳光纤在直径、长度等参数方面的重复性难以保证, 适用于条件简易、对微纳光纤参数精确度要求不

图 5 (网络版彩图)从块状玻璃中直接拉制微纳光纤的示意图. (a) 将块状玻璃移向由CO₂激光或火焰加热的蓝宝石光纤; (b) 蓝宝石光纤末端熔入块状玻璃; (c) 将块状玻璃移出; (d) 将第二根蓝宝石光纤与第一根蓝宝石光纤末端附着的熔融玻璃接触; (e) 平拉第二根蓝宝石光纤; (f) 在蓝宝石光纤的一端形成微纳光纤^[29]

Figure 5 (Color online) Schematic diagram illustrating the direct draw of nanofibers from bulk glasses. (a) A bulk glass is moved towards a sapphire fiber heated by a CO₂ laser or flame; (b) the sapphire fiber end is immersed into the bulk glass through local melting; (c) withdraw the bulk glass; (d) a second sapphire fiber is brought into contact with the molten-glass-coated end of the first sapphire fiber; (e) pull the second sapphire fiber; (f) a micro-/nanofiber is formed at the end of the taper [29].

图 6 (a) 手持式火焰加热制备的三根微纳光纤的扫描电子显微镜(SEM)图像. 直径分别为140, 510和30 nm (从左上到右下); (b) 直径为150 nm的微纳光纤缠绕在4 μm直径的光纤周围的SEM图像^[28]

Figure 6 (a) Scanning electron microscopy (SEM) image of three manually drawn silica nanofibers placed in a bundle. The diameters of the nanofibers are 140, 510 and 30 nm (from top left to bottom right respectively); (b) SEM image of a 150 nm diameter silica nanofibers wrapped around a 4 μm diameter fiber [28].

高或需快速制备等场合.

3.1.2 火焰加热机械扫描拉伸法

为避免手持式拉伸方法存在良品率较低、对经验要求较高、重复性较差等问题, 可以利用机械平移台来精确控制拉伸参数. 比如, 2004年, Brambilla等人^[30]利用火焰加热机械扫描拉伸法制备了直径小至260 nm的微纳光纤, 具有损耗低、直径均匀度高等特点. 近年来, 随着人们的不断改进, 已经形成了一套较为成熟的火焰加热机械扫描拉伸方法及对应的实验系统配置方

案^[31,32].

基于“火焰刷”模型, 火焰加热机械扫描拉伸法一方面通过机械位移台实时控制光纤拉伸长度, 从而在一定程度上实现微纳光纤的直径控制和制备的可重复性; 另一方面, 通过自动控制拉伸过程中加热温度的稳定分布以及加热区域(即光纤腰区)长度的变化, 可以拉制包括线性型、指数型、正弦型等各种形貌的微纳光纤. 另外, 这种更为自动化、机械化的制备方法明显降低了微纳光纤的传输损耗^[33].

精确地改变和控制火焰和光纤之间的相对位置是实现“火焰刷”的前提, 一般有以下三种实现方案^[29]. 第一, 如图7(a)所示, 采用复合式位移平台, 火焰不动, 下面的位移台往返移动, 上方的位移台单向移动拉伸光纤. 该方案需要较大的动力来移动下方机械滑台, 由此产生的较强的惯性可能影响移动精度和稳定性. 第二, 同样保持火焰静止, 不同的是采用两个独立的位移台, 位移台的移动速度叠加了同向移动和反向移动两部分, 通过反向移动(速度相同, 方向相反)来拉伸光纤, 同向移动(速度不同, 方向相同)来实现“火焰刷”, 该方案对两个位移台的协同性要求比较高, 如图7(b)所示. 第三, 采用三个位移台, 与方案二类似的是, 通过

图 7 (网络版彩图)三种利用“火焰刷”模型的加热扫描拉伸方案. (a) 带有复合式位移平台的固定火焰方案示意图; (b) 带有独立位移平台的固定火焰方案示意图; (c) 带有独立位移平台的移动火焰方案示意图. 双箭头表示往复运动^[34]

Figure 7 (Color online) Three heating and stretching schemes using the “flame brush” approach. Schematic diagrams of (a) a stationary flame with stacked pulling stages; (b) a stationary flame with independent pulling stages; (c) a moving flame with independent pulling stages. Double headed arrows indicate oscillating motion [34].

两个独立的一维位移台的相对运动(速度相同, 方向相反)来拉伸光纤, 但由另外一个被安装上火焰喷嘴的位移台来实现“火焰刷”. 然而, 由于火焰在来回运动时受气流影响容易发生畸变, 难以保证控制过程的高度稳定性. 近年来, 随着高精度、高可控性位移台的普及, 在高精度微纳光纤制备中, 人们越来越多地偏向于采用第二种方案的火焰加热机械扫描拉伸方式, 具体装置可能不尽相同, 但基本结构一致.

通过对装置硬件和控制软件的不断升级, 研究者们采用火焰加热机械扫描拉伸法先后制备出了一系列性能优良、形貌可控的微纳光纤. 比如, 前述Brambilla等人^[31]使用火焰加热机械扫描拉伸法所制备的微纳光纤比先前手持式火焰加热拉伸法^[27]制备的微纳光纤在1.55 μm 波段的总体光传输损耗(主要来自于拉锥过渡区损耗)低一个数量级左右(图8(a)). 2014年, Hoffman等人^[32]基于火焰加热机械扫描拉伸法, 制备的低损耗微纳光纤, 在1.55 μm 处测得 $99.95\% \pm 0.02\%$ 的单模透射率(对应损耗低至 2.6×10^{-5} dB/mm). 同时, 由于

该方法可以灵活控制拉伸过程中的加热区域大小, 可制备多种形貌的微纳光纤. 比如, 2014年 Ward等人^[34]制备了直径分别约为1 μm 的指数型和线性型微纳光纤(图8(b)和(c)), 在780 nm波长处分别实现了约99%和98%(对于 HE_{11} 模)的透过率. 此外, Pricking等人^[35,36]提出了高精度模拟光纤拉伸过程的模型, 并基于该模型制备了正弦型微纳光纤(图8(d)).

3.2 电加热机械扫描拉伸法

虽然火焰加热是目前最普遍的加热方式, 但是火焰容易受环境气流影响(比如, 制备中通常需要严格控制超净室气流), 且燃烧后的产物(比如OH根)可能附着在微纳光纤表面, 对微纳光纤造成一定的污染或特定波段的光谱吸收. 为避免上述影响, 可使用基于电加热方式的机械扫描拉伸法.

电加热方法与上述火焰加热制备方法均基于“火焰刷”原理, 不同之处在于此方法的热源为微型电加热器^[37,38]. 这样, 一方面可以克服火焰加热中易受气流扰

图 8 (网络版彩图) (a) 使用“火焰刷”方法制备的微纳光纤的光学损耗与文献^[27]报道的损耗值之间的比较. 插图中的动态损耗和静态损耗分别是指在微纳光纤制备期间和之后所测量的损耗值^[30]; (b) 指数锥形微纳光纤的形貌测量(插图: 微纳光纤的功率透过率曲线)^[34]; (c) 指数形貌微纳光纤的实测与预期的形貌对比^[34]; (d) 正弦调制型微纳光纤的形貌测量, 其放大图如插图所示^[35]

Figure 8 (Color online) (a) Comparison between specific losses of the tapers fabricated using the “flame brush” approach and the data reported in ref. [27]. The dynamic and static losses in the inset refer to measurements performed during the nanotaper fabrication and after it, respectively [30]; (b) the measured profile of a exponential tapered micro-/nanofiber (Inset: power transmittance curve of the micro-/nanofiber) [34]; (c) a comparison of the measured and the expected profile of an exponentially shaped micro-/nanofiber [34]; (d) a measured profile of a sinusoidally modulated micro-/nanofiber, and a zoom-in is demonstrated by the inset [35].

动及燃烧产物造成表面污染的问题^[39], 另一方面, 电阻式的微加热器^[40]可以通过改变电流灵活准确地实现温度调节, 而且可以在特定保护气氛下工作, 故其不仅适用于二氧化硅玻璃等高稳定材料的微纳光纤制备, 也可用于低熔点、易氧化或分解的复合材料的微纳光纤制备^[41,42]. 比如, 2005年Brambilla等人^[41]利用该方法制备了硅酸铅和硅酸铋高非线性微纳光纤, 在1550 nm处实现了低至0.1–1 dB/mm的传输损耗, 所制备的微纳光纤的直径可以小至90 nm.

图9所示为典型的微型电加热装置及其所制备的微纳光纤的相关特性^[43]. 该装置采用陶瓷电加热器, 温度可达1160°C, 所制备的微纳光纤损耗低(透过率达到99%); 同时, 由于加热区温度分布比较均匀, 微纳光纤拉锥区的形貌也较为严格地遵循Birks和Li模型^[21]

图9 (网络版彩图) (a) 典型微型电加热机械扫描拉伸装置; (b) 陶瓷电加热器实物照片; (c) 拉锥光纤形貌分布的实验测量值(按照指数关系分布); (d) 光纤拉锥过程中的透过率曲线^[43]

Figure 9 (Color online) (a) Typical micro-electric heating mechanical stretching device; (b) ceramic thermoelectric heater; (c) experimental measurement of morphology distribution of tapered fiber (distribution according to exponential relationship); (d) recorded fiber-taper transmission as a function of the elongation length [43].

所预测的指数分布规律.

当然, 电加热机械扫描拉伸法也存在一定的局限, 由于微加热器的加热区域通常较长^[43](厘米量级), 与比较理想的点加热源有一定的差距, 使得这种方法在形貌控制上不如火焰加热机械扫描拉伸法那么灵活自由.

3.3 CO₂激光加热机械扫描拉伸法

CO₂激光加热机械扫描拉伸法同样是基于“火焰刷”模型, 由于二氧化硅材料在远红外区域吸收强烈, 因此, 当CO₂激光(波长10.6 μm)直接聚焦至光纤上时, 可产生1700°C以上的高温, 形成稳定且无污染的加热区域^[44].

该方法通过控制扫描镜的转动实现了拉制过程中加热区域的变化, 其典型的实验装置如图10(a)所示^[45], 随着光纤直径的逐渐变细, 光纤对激光的有效吸收下降, 加热温度可能降至拉伸温度以下, 因此, CO₂激光功率需相应地提高. 如图10(b)所示, CO₂激光功率与微纳光纤直径呈指数关系, 所制备的微纳光纤直径最小约为3–4 μm^[45], 形貌特征如图10(c), 基本符合“火焰刷”模型的推论^[46]. 为了解决激光直接加热难以制备小直径微纳光纤的问题, 2004年Sumetsky等人^[47]提出了一种CO₂激光间接加热的制备方案. 如图10(d)所示, 先将激光照射在蓝宝石套管表面, 以激光加热后的蓝宝石管作为热源加热拉伸玻璃光纤, 获得直径小至100 nm的微纳光纤. 该装置的原理与上述电加热机械扫描拉伸法基本一致.

上述方法排除了火焰加热扫描拉伸法带来的气流干扰和污染问题, 同时, 通过调节激光功率可以灵活调节加热温度. 另外, 相对于电加热机械扫描拉伸法, 激光聚焦直接加热光纤方法更符合“火焰刷”模型中“区域均匀加热源”的假定. 然而, 制备直径较小的光纤需要更大的激光功率. 当光纤直径小到一定程度时(<1 μm), 所需光功率在一般实验室很难达到^[41]. 因此, 该方法与上述两种方法相比, 制备直径较小的微纳光纤时难度相对较大. 又考虑到CO₂激光器的成本问题, 因此近年来利用CO₂激光聚焦加热扫描拉伸法制备微纳光纤的相关研究较少.

总的来说, 上述火焰加热机械扫描拉伸法、电加热机械扫描拉伸法及CO₂激光加热扫描拉伸法都是改进型的“火焰刷”拉伸制备方法, 由于采用高精度机械

拉伸台相对加热源进行扫描, 免除了原先火焰本身扫描时横向气流引起的温区不稳定性, 因此在制备具有较长均匀腰区的微纳光纤时具有更高的可靠性、重复性及精确度, 能够更好地控制微纳光纤的腰区长度和均匀性. 各方法优缺点比较如表1所示, 可根据实际情况选择所需的制备方法.

3.4 聚合物材料微纳光纤的制备方法

除了玻璃材料外, 聚合物材料也具有诸多优良特性, 包括选择性渗透、生物兼容和对多数功能性掺杂剂的亲和性, 可以作为功能化微纳光纤的原材料. 具

有光学质量的聚合物微纳光纤通常使用溶液法拉制. 比如, 2004年Harfenist等人^[48]使用AFM探针及其阵列浸入黏滞度合适的PMMA聚合物溶液, 拉制出了直径为50 nm–20 μm 的PMMA微纳光纤(图11(a)). 之后, 一系列高质量聚合物微纳光纤, 包括掺杂荧光染料、化学指示剂、量子点以及金属纳米颗粒的功能化聚合物微纳光纤, 均已经被Liu等人^[49–54]成功制备出来.

另外, 2012年, Long等人^[55]参考聚合物微纳光纤的制备方法, 以DNA-CTMA溶液为原料, 通过拉丝的方法得到了DNA微纳光纤, 如图11(b)所示.

静电纺丝技术也是制备聚合物微纳光纤的一种常

图 10 (网络版彩图) (a) 典型的CO₂激光加热装置示意图^[45]; (b) 加热功率和拉锥光纤腰区最小直径的关系图^[45]; (c) 拉锥光纤形貌分布的实验测量值(按照指数关系分布)^[46]; (d) CO₂激光加热蓝宝石套管光纤拉伸法示意图^[47]

Figure 10 (Color online) (a) Schematic diagram of a typical CO₂ laser focusing heating device [45]; (b) relationship between heating power and the minimum diameter of the tapered fiber waist region [45]; (c) experimental measurement of morphology distribution of tapered fiber (distribution according to exponential relationship) [46]; (d) schematic diagram of CO₂ laser heated sapphire tube fiber drawing method [47].

表 1 微纳光纤典型制备方法优缺点比较

Table 1 Comparison of typical methods for micro-/nanofiber fabrication

制备方法	优点	缺点
火焰加热手持式拉伸法	装置简单, 制备速度快	重复性较差, 良品率较低
火焰加热机械扫描拉伸法	精确制备, 形貌控制, 透过率高	必须在氧气环境下制备, 火焰燃烧产物(如OH根)有可能附着光纤表面
电加热机械扫描拉伸法	可精确调节加热温度, 可在特定气氛下制备	商用电加热器高温区尺寸较大, 影响特定形貌控制
CO ₂ 激光聚焦加热扫描拉伸法	加热速度快, 可调温度范围大, 可在特定气氛下制备	对于小直径微纳光纤, 无法直接照射加热, 激光功率长时间稳定性不够好

用技术. 典型的静电纺丝装置(图12(a))主要由喷头、高压电源和收集装置构成^[56]. 通过高压静电场的作用, 高分子溶液或熔融体经过喷射、拉伸、劈裂、固化以及溶剂挥发, 最后在接收极板上方形形成一维微纳光纤. 所制备的聚合物微纳光纤(图12(b))具有连续性好、长度长、孔隙率高等优点, 直径可在几微米到几十纳米范围内调控^[57]. 与其他方法相比, 采用静电纺丝法制备的微纳纤维种类多、成本低, 可实现大批量生产^[58], 但是由于存在表面质量不够高等问题, 一般光传输损耗比较大.

此外, 飞秒激光直写技术也被用于制备微纳光纤结构. 基于超短脉冲激光与物质非线性作用和材料的阈值效应, 以及远小于物质热弛豫时间的脉冲宽度和作用时间(比如100 fs量级), 该方法的加工精度可达纳米量级, 而且对材料的热损伤较小. 如图13(a)所示, 飞秒激光加工系统主要包括实时监测系统、三维精密移动系统和软件控制系统. 图13(b)是基于SU8光刻胶材料的双光子吸收原理所制备的微纳光纤阵列, 光纤直径最小为200 nm左右^[59]. 从图中可看出, 微纳光纤表面较为光滑, 可用于Sagnac谐振环等光波导器件的制备.

图 11 溶液提拉法制备的聚合物微纳光纤(a)^[48]和DNA微纳光纤的显微照片(b)^[55]

Figure 11 Microscope images of polymer (a) [48] and DNA (b) [55] micro-/nanofibers fabricated by direct drawing from solution.

图 12 (网络版彩图) (a) 典型静电纺丝装置示意图^[56]; (b) 聚合物微纳光纤电镜图^[57]

Figure 12 (Color online) (a) Schematic diagram of the typical electrospinning device [56]; (b) SEM image of the polymer micro-/nanofibers [57].

图 13 (网络版彩图) (a) 双光子聚合系统示意图; (b) SU8胶微纳光纤的扫描电子显微镜图像^[59]

Figure 13 (Color online) (a) Schematic diagram of two-photon polymerization system; (b) SEM image of SU8 glue micro-/nanofibers [59].

最后, 化学腐蚀法也是制备微纳光纤常用的方法之一^[60]. 该方法主要利用氢氟酸等与玻璃光纤发生化学反应, 对光纤进行化学腐蚀而改变形貌. 通过控制氢氟酸浓度及反应时间, 可将玻璃光纤腐蚀成不同直径的微纳光纤. 与高温拉伸法相比, 该方法制备的微纳光纤表面质量有待进一步提高^[61].

4 直径精确反馈控制制备及在线测量方法

基于“火焰刷”加热模型对光纤直径的预测, 前述利用火焰/电/CO₂激光加热的机械扫描拉伸制备方法可以实现一定程度的微纳光纤直径控制. 比如, 对于制备直径大于15 μm的微光纤, 直径控制精度可以达到2%(即不小于300 nm的直径不确定度), 但是对于直径

为500 nm的光纤, 直径控制精度则降至7%(即35 nm的直径不确定度)^[32]. 而且, 考虑到热区温度分布的均匀性、拉锥过程中的重力作用、环境中气流的扰动、电机移动的误差以及光纤初始状态的不同等诸多因素, 上述制备方法在光纤直径的精确控制方面难以满足要求.

在此, 我们介绍近年来发展起来的基于光纤中高阶模截止条件与光纤直径的对应关系, 来实现微纳光纤制备过程中直径精确反馈控制的方法, 以及微纳光纤直径的在线测量方法.

4.1 基于高阶模式截止的直径精确反馈控制

2014年, Yu等人^[62]提出通过利用LP₀₂模截止时对应模间干涉特征突变的位置作为微纳光纤直径的判据, 来实现较为精确的微纳光纤直径反馈控制. 实验中通过将1550 nm波长的激光作为监测光耦合进1550 nm单模光纤中, 在拉制过程中实时监测光纤输出端激光功率的变化(图14). 从图中可以看出, 在光纤拉伸时间约100 s时开始出现干涉现象(对应腰区直径约为40 μm), 表明光纤内开始出现高阶模式. 随着光纤腰区直径进一步减小, 传输模式数增加, 干涉谱变密. 在拉伸时间约400 s后(对应腰区直径约为3.4 μm , 小于该直径时LP₀₃模等低阶模开始逐渐截止), 干涉谱逐渐变稀、幅度变小, 传输的高阶模式逐渐截止. 值得注意的是, 在LP₀₂(HE₁₂)模截止时刻, 出现了明显的相干强度阶梯变化(见图中“cut-off”所示位置).

当微纳光纤的模间干涉谱发生上述突变时, 光纤腰锥直径约为1.78 μm . 因此, 实验中利用干涉谱对拉伸系统进行校准, 当误差较大时可进行拉伸参数修正以提高系统拉伸制备精度. 实验结果表明, 利用LP₀₂模截止时对应模间干涉的特征突变位置作为微纳光纤直径的判据, 控制微纳光纤拉制过程, 可将微纳光纤制备中的直径误差降至2%左右^[62].

为进一步提高直径控制精度, 2017年, Xu等人^[63]提出通过精确测量两个高阶模截止突变点之间的时间间隔, 再根据所设目标直径确定停止拉伸的时间, 实现了高精度的微纳光纤直径控制. 所用的制备系统如图15所示, 位移台拉伸速度约0.1 mm/s, 使用2 nm线宽、785 nm波长连续激光作为监测光, 通过光电探测器监控光纤输出光强, 获得拉伸过程中激光功率的动态变化曲线.

图16(a)为785 nm波长下, 光纤内传输模式的有效

图14 (网络版彩图)光纤拉锥过程中1550 nm波长监测光的功率变化曲线^[62]

Figure 14 (Color online) Optical power curve of the monitoring light at 1550 nm during tapering ^[62].

图15 (网络版彩图)光纤拉锥实验装置示意图^[63]

Figure 15 (Color online) Schematic diagram of experimental device for fiber taper ^[63].

折射率与光纤直径的对应关系. 在光纤拉伸过程中, 由于高阶模式的逐渐截止, 785 nm波长监测光在光纤输出端的功率强度会发生明显的下降, 表现为图16(b)功率透过率曲线中的两个阶梯状突变, 分别对应HE₂₃和HE₂₂两个模式的截止. 图16(c)为上述透过率曲线突变区域的放大图像^[64,65]. 根据“火焰刷”加热模型^[21], 通过精确测量光纤拉锥过程中监测光透过率曲线中两个突变点之间的时间间隔, 可以精确确定停止拉伸控制程序的时间点, 从而获得所需直径. 实验结果表明, 在800–1300 nm直径范围内制备微纳光纤, 可实现优于5 nm (约0.6%)的直径控制精度.

基于该方法制备微纳光纤的典型实验系统实物照片如图17所示, 所制备的微纳光纤已被用于超灵敏微纳光纤触觉传感器^[66]等器件.

最近, 我们使用宽带传输光结合光纤光谱仪快速探测, 可在任意波长通过光纤透射强度的突降, 快速定位预设直径在对应波长处的TE₀₁模截止点, 实时反馈控制光纤拉伸过程, 在360–680 nm直径范围内, 实现了2 nm的超高直径控制精度^[67].

4.2 微纳光纤直径的在线测量方法

除了在制备过程中对微纳光纤的直径进行精确控制, 人们对微纳光纤直径的非破坏在线测量也有较多的关注和研究. 目前已经提出的几种非破坏测量微纳

图 16 (网络版彩图) (a) 模式有效折射率与光纤直径的关系图; (b) 光纤拉锥过程中 785 nm 波长监测光的透过率曲线; (c) 功率阶梯变化区域曲线的放大图^[63]

Figure 16 (Color online) (a) Relationship between the effective refractive index of the mode and the fiber diameter; (b) transmittance curve of the monitoring light at 785 nm during the tapering; (c) magnified graph of the power step change [63].

图 17 (网络版彩图) 光纤拉锥装置的实物照片(主要部分)^[66]

Figure 17 (Color online) Experimental photo of the fiber taper device (main part) [66].

光纤直径的方法如图 18 所示。

图 18(a) 为 Sumetsky 等人^[68]提出的利用回音壁模式测量微纳光纤直径的方法, 该方法使用标准光纤作为探针, 沿着传输基模的微纳光纤滑动, 光纤中所激发的回音壁模式引起的微纳光纤基模损耗比例取决于与之接触的微纳光纤中传播模式的空间分布。根据测得的随微纳光纤长度方向的损耗变化, 可以获得微纳

光纤的直径变化, 测量精度可达到亚纳米量级。

图 18(b) 为 Wiedemann 等人^[69]提出的基于二次及三次谐波产生条件判据的直径测量技术。由于谐波的产生要满足模间相位匹配条件, 根据该条件可获得微纳光纤直径和谐波波长的一一对应关系, 在 0.19–1 μm 直径范围内, 测量分辨率达到 0.5 nm, 测量精度优于 2%。

此外, Warken 等人^[70]利用线性偏振激光聚焦垂直照射微纳光纤, 从理论和实验上分析对比了经过光纤衍射后的衍射强度分布与光纤直径的关系, 演示了一种从衍射图样中快速获得微纳光纤直径的方法(图 18(c))。对于直径大于 500 nm 的微纳光纤, 可获得优于 50 nm 的直径测量精度。Keloth 等人^[71]利用微纳光纤耦合光栅形成复合光子晶体微腔(图 18(d)), 基于该复合腔共振波长与微纳光纤直径的关系, 反推微纳光纤的直径, 实现光纤直径的无损、原位测量, 对于 350–600 nm 直径的微纳光纤, 测量精度可达到 10 nm。

5 总结

随着微纳光纤在光学近场耦合、传感检测、原子光学、光力操控等方面获得越来越多的研究和关注,

图 18 (网络版彩图) (a) 利用回音壁模式测量光纤形貌变化^[68]; (b) 基于二次谐波和三次谐波的直径测量装置^[69]; (c) 利用衍射图样测量直径的实验装置^[70]; (d) 利用光子晶体腔模测量直径的装置^[71]

Figure 18 (Color online) (a) Measurement method for measuring the fiber's morphological changes using the echo wall mode [68]; (b) diameter measuring device based on second harmonic and third harmonic [69]; (c) experimental device for measuring the fiber's diameter using a diffraction pattern [70]; (d) device for measuring the fiber's diameter using photonic crystal cavity mode [71].

人们对微纳光纤的精确制备也提出了越来越高的要求。本文较为系统地介绍及比较了微纳光纤的典型制备方案, 直径精确反馈控制制备及在线测量方法, 可以为相关研究提供参考。

总的来说, 目前的研究在直径精确控制方面已经取得了重要进展, 直径控制精度可以达到 ± 2 nm以内; 在形貌控制方面, 此前利用火焰刷技术, 实验上已经实现了指数型、线性型、正弦型等各种形貌的微纳光纤, 具备较好的形貌控制能力。但是, 火焰刷模型假设热区温度均匀分布, 与实际火焰温区的温度梯度分布有差异; 另外, 在实际制备过程中, 火焰做横向扫描运

动时易受气流影响, 导致温区温度分布的不稳定性, 对于实现光纤直径和形貌的精细控制增加了不确定性。因此, 在光纤形貌的高精度控制方面, 进一步改进机械扫描拉伸方式, 提高控制精度, 研究及使用更好的加热源, 可作为进一步研究的方向。在透过率方面, 基于1550 nm单模光纤所制备的微纳光纤在1550 nm波长处单模工作的透过率最高已达99%以上, 插入损耗已经低于一般的光纤熔接损耗, 但仍有提升的空间。同时, 在微纳光纤制备过程中同时实现直径和形貌的高精度控制方面, 目前研究不多, 也是未来进一步提高微纳光纤制备技术的努力方向。

致谢 感谢蔡大卫同学和余文同学在论文写作中的帮助, 及徐颖鑫同学在火焰加热机械扫描拉伸制备微纳光纤方面的有益讨论。

参考文献

- 1 Tong L, Lou J, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides. *Opt Express*, 2004, 12: 1025–1035
- 2 Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: A review. *J Opt*, 2010, 12: 043001
- 3 Nayak K P, Sadgrove M, Yalla R, et al. Nanofiber quantum photonics. *J Opt*, 2018, 20: 073001
- 4 Li Y, Wang L, Kang Y, et al. Microfiber-enabled dissipative soliton fiber laser at 2 μm . *Opt Lett*, 2018, 43: 6105–6108
- 5 Schneeweiss P, Zeiger S, Hoinkes T, et al. Fiber ring resonator with a nanofiber section for chiral cavity quantum electrodynamics and multimode strong coupling. *Opt Lett*, 2017, 42: 85–88, arXiv: 1611.01454
- 6 Jung Y, Brambilla G, Richardson D J. Optical microfiber coupler for broadband single-mode operation. *Opt Express*, 2009, 17: 5273–5278
- 7 Luo J, Wang J, Bitzek E, et al. Size-dependent brittle-to-ductile transition in silica glass nanofibers. *Nano Lett*, 2016, 16: 105–113

- 8 Korposh S, James S W, Lee S W, et al. Tapered optical fibre sensors: Current trends and future perspectives. *Sensors*, 2019, 19: 2294
- 9 Sagué G, Vetsch E, Alt W, et al. Cold-atom physics using ultrathin optical fibers: Light-induced dipole forces and surface interactions. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 163602, arXiv: [quant-ph/0701167](#)
- 10 Abdul Khudus M I M, De Lucia F, Corbari C, et al. Phase matched parametric amplification via four-wave mixing in optical microfibers. *Opt Lett*, 2016, 41: 761–764
- 11 Klimov V V, Ducloy M. Spontaneous emission rate of an excited atom placed near a nanofiber. *Phys Rev A*, 2002, 69: 013812
- 12 Guo X, Qiu M, Bao J, et al. Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits. *Nano Lett*, 2009, 9: 4515–4519
- 13 Brambilla G, Xu F. Adiabatic submicrometric tapers for optical tweezers. *Electron Lett*, 2007, 43: 204–206
- 14 Vetsch E, Reitz D, Sagué G, et al. Optical interface created by laser-cooled atoms trapped in the evanescent field surrounding an optical nanofiber. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 203603, arXiv: [0912.1179](#)
- 15 Tong L, Zi F, Guo X, et al. Optical microfibers and nanofibers: A tutorial. *Opt Commun*, 2012, 285: 4641–4647
- 16 Leon-Saval S G, Birks T A, Wadsworth W J, et al. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides. *Opt Express*, 2004, 12: 2864–2869
- 17 Foster M A, Gaeta A L. Ultra-low threshold supercontinuum generation in sub-wavelength waveguides. *Opt Express*, 2004, 12: 3137–3143
- 18 Grubsky V, Feinberg J. Phase-matched third-harmonic UV generation using low-order modes in a glass micro-fiber. *Opt Commun*, 2007, 274: 447–450
- 19 Lee T, Jung Y, Codemard C A, et al. Broadband third harmonic generation in tapered silica fibres. *Opt Express*, 2012, 20: 8503–8511
- 20 Khudus M I M A, Lee T, De Lucia F, et al. All-fiber fourth and fifth harmonic generation from a single source. *Opt Express*, 2016, 24: 21777–21793
- 21 Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers. *J Lightwave Technol*, 1992, 10: 432–438
- 22 Boys C V. On the production, properties, and some suggested uses of the finest threads. *Phil Mag*, 1887, 23: 489–499
- 23 Marcuse D, Derosier R M. Mode conversion caused by diameter changes of a round dielectric waveguide. *Bell Syst Technical J*, 1969, 48: 3217–3232
- 24 Brambilla G, Xu F, Horak P, et al. Optical fiber nanowires and microwires: Fabrication and applications. *Adv Opt Photon*, 2009, 1: 107–161
- 25 Tong L M, Pan X Y. Subwavelength-diameter optical fibers: Waveguiding properties and photonic applications (in Chinese). *Physics*, 2007, 36: 626–630 [童利民, 潘欣云. 亚波长直径光纤的光学传输特性及其应用. *物理*, 2007, 36: 626–630]
- 26 Zhang L, Gu F, Tong L, et al. Simple and cost-effective fabrication of two-dimensional plastic nanochannels from silica nanowire templates. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 5: 727–732
- 27 Tong L, Gattass R R, Ashcom J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding. *Nature*, 2003, 426: 816–819
- 28 Tong L, Lou J, Ye Z, et al. Self-modulated taper drawing of silica nanowires. *Nanotechnology*, 2005, 16: 1445–1448
- 29 Tong L, Hu L, Zhang J, et al. Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses. *Opt Express*, 2006, 14: 82–87
- 30 Brambilla G, Finazzi V, Richardson D J. Ultra-low-loss optical fiber nanotapers. *Opt Express*, 2004, 12: 2258–2263
- 31 Brambilla G, Xu F, Feng X. Fabrication of optical fibre nanowires and their optical and mechanical characterisation. *Electron Lett*, 2006, 42: 517–519
- 32 Hoffman J E, Ravets S, Grover J A, et al. Ultrahigh transmission optical nanofibers. *AIP Adv*, 2014, 4: 067124, arXiv: [1405.3258](#)
- 33 Clohessy A M, Healy N, Murphy D F, et al. Short low-loss nanowire tapers on singlemode fibres. *Electron Lett*, 2005, 41: 954–955
- 34 Ward J M, Maimaiti A, Le V H, et al. Contributed review: Optical micro- and nanofiber pulling rig. *Rev Sci Instruments*, 2014, 85: 111501, arXiv: [1402.6396](#)
- 35 Pricking S, Giessen H. Tapering fibers with complex shape. *Opt Express*, 2010, 18: 3426–3437
- 36 Xuan H, Ju J, Jin W. Highly birefringent optical microfibers. *Opt Express*, 2010, 18: 3828–3839
- 37 Takeuchi Y, Noda J. Novel fiber coupler tapering process using a microheater. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, 4: 465–467
- 38 Takeuchi Y, Horiguchi M. Microheater control of wavelength-flattened fiber coupler properties. *Appl Opt*, 1994, 33: 1029–1034
- 39 Xu Y, Cui L, Li X, et al. Spectra of spontaneous Raman scattering in taper-drawn micro/nano-fibers. *Chin Phys B*, 2016, 25: 124205
- 40 Shi L, Chen X, Liu H, et al. Fabrication of submicron-diameter silica fibers using electric strip heater. *Opt Express*, 2006, 14: 5055–5060
- 41 Brambilla G, Koizumi F, Feng X, et al. Compound-glass optical nanowires. *Electron Lett*, 2005, 41: 400–402
- 42 Coillet A, Cluzel B, Vienne G, et al. Near-field characterization of glass microfibers on a low-index substrate. *Appl Phys B*, 2010, 101: 291–295

- 43 Ding L, Belacel C, Ducci S, et al. Ultralow loss single-mode silica tapers manufactured by a microheater. *Appl Opt*, 2010, 49: 2441–2445, arXiv: [1001.3076](#)
- 44 Grellier A J C, Zayer N K, Pannell C N. Heat transfer modelling in CO₂ laser processing of optical fibres. *Opt Commun*, 1998, 152: 324–328
- 45 Dimmick T E, Kakarantzas G, Birks T A, et al. Carbon dioxide laser fabrication of fused-fiber couplers and tapers. *Appl Opt*, 1999, 38: 6845–6848
- 46 Ward J M, O'Shea D G, Shortt B J, et al. Heat-and-pull rig for fiber taper fabrication. *Rev Sci Instruments*, 2006, 77: 083105, arXiv: [physics/0604049](#)
- 47 Sumetsky M, Dulashko Y, Hale A. Fabrication and study of bent and coiled free silica nanowires: Self-coupling microloop optical interferometer. *Opt Express*, 2004, 12: 3521–3531
- 48 Harfenist S A, Cambron S D, Nelson E W, et al. Direct drawing of suspended filamentary micro- and nanostructures from liquid polymers. *Nano Lett*, 2004, 4: 1931–1937
- 49 Liu H, Edel J B, Bellan L M, et al. Electrospun polymer nanofibers as subwavelength optical waveguides incorporating quantum dots. *Small*, 2006, 2: 495–499
- 50 Gu F, Zhang L, Yin X, et al. Polymer single-nanowire optical sensors. *Nano Lett*, 2008, 8: 2757–2761
- 51 Song Q H, Liu L Y, Xu L. Lasing action in dye doped polymer nanofiber knot resonator. *J Lightwave Technol*, 2009, 27: 4374–4376
- 52 Gu F, Yu H, Wang P, et al. Light-emitting polymer single nanofibers *via* waveguiding excitation. *ACS Nano*, 2010, 4: 5332–5338
- 53 Meng C, Xiao Y, Wang P, et al. Quantum-dot-doped polymer nanofibers for optical sensing. *Adv Mater*, 2011, 23: 3770–3774
- 54 Wang P, Zhang L, Xia Y, et al. Polymer nanofibers embedded with aligned gold nanorods: A new platform for plasmonic studies and optical sensing. *Nano Lett*, 2012, 12: 3145–3150
- 55 Long W, Zou W, Li X, et al. DNA optical nanofibers: Preparation and characterization. *Opt Express*, 2012, 20: 18188
- 56 Dan L, Xia Y N. Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel? *Adv Mater*, 2004, 16: 1151–1170
- 57 Wang P, Wang Y, Tong L. Functionalized polymer nanofibers: A versatile platform for manipulating light at the nanoscale. *Light Sci Appl*, 2013, 2: e102
- 58 Chen Q, Mei X, Shen Z, et al. Direct write micro/nano optical fibers by near-field melt electrospinning. *Opt Lett*, 2017, 42: 5106–5109
- 59 Liu Z J. Research of Preparation and Sensing Properties of Micro-/Nanofibers' Fabrication and Their Sensitive Characteristics (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Changchun: Jilin University, 2016 [刘子健. 微纳光纤的制备和传感性质研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2016]
- 60 Zhang T, Liu Y G, Liu X, et al. Preparation of micro-nano optical fiber and study on its optical property (in Chinese). *Piezoelect Acoustoopt*, 2018, 40: 704–708 [张庭, 刘颖刚, 刘鑫, 等. 微纳光纤的制备及其光学特性研究. 压电与声光, 2018, 40: 704–708]
- 61 Kbashi H J. Fabrication of submicron-diameter and taper fibers using chemical etching. *J Mater Sci Tech*, 2012, 28: 308–312
- 62 Yu Y, Zhang X, Song Z, et al. Precise control of the optical microfiber tapering process based on monitoring of intermodal interference. *Appl Opt*, 2014, 53: 8222–8228
- 63 Xu Y, Fang W, Tong L. Real-time control of micro/nanofiber waist diameter with ultrahigh accuracy and precision. *Opt Express*, 2017, 25: 10434–10440
- 64 Frawley M C, Petcu-Colan A, Truong V G, et al. Higher order mode propagation in an optical nanofiber. *Opt Commun*, 2012, 285: 4648–4654
- 65 Jung Y, Brambilla G, Richardson D J. Broadband single-mode operation of standard optical fibers by using a sub-wavelength optical wire filter. *Opt Express*, 2008, 16: 14661–14667
- 66 Zhang L, Pan J, Zhang Z, et al. Ultrasensitive skin-like wearable optical sensors based on glass micro/nanofibers. *Opto-Electron Adv*, 2020, 3: 190022
- 67 Kang Y, Gong J, Xu Y, et al. Ultrahigh-precision diameter control of nanofiber using direct mode cutoff feedback. *IEEE Photon Technol Lett*, 2020, 32: 219–222
- 68 Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M, et al. Probing optical microfiber nonuniformities at nanoscale. *Opt Lett*, 2006, 31: 2393–2395
- 69 Wiedemann U, Karapetyan K, Dan C, et al. Measurement of submicrometre diameters of tapered optical fibres using harmonic generation. *Opt Express*, 2010, 18: 7693–7704
- 70 Warken F, Giessen H. Fast profile measurement of micrometer-sized tapered fibers with better than 50-nm accuracy. *Opt Lett*, 2004, 29: 1727–1729

- 71 Keloth J, Sadgrove M, Yalla R, et al. Diameter measurement of optical nanofibers using a composite photonic crystal cavity. *Opt Lett*, 2015, 40: 4122–4125

Fabrication methods and high-precision diameter control techniques of optical micro-/nanofibers

KANG Yi, LIU KeYing, XIE Yu, GONG Jue, YAO Ni, FANG Wei, GUO Xin,
ZHANG Lei, WANG Pan & TONG LiMin^{*}

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou 310027, China*

Owing to their favorable properties including small sizes, tight optical confinement, large fractional evanescent fields, and low waveguiding losses, optical micro-/nanofibers have attracted broad research interest and technological applications in recent years, in which the precision in micro-/nanofiber fabrication is critical to determine their waveguiding properties and performances. Here, we firstly introduce the principles of high-temperature taper drawing of glass fibers. Next, we review typical fabrication methods including flame-heated manual drawing approach, flame-heated mechanical drawing technique, electric-heated mechanical drawing technique and laser-heated mechanical drawing technique. Cons and pros of the above-mentioned techniques are discussed, followed by a brief introduction to the fabrication of polymer micro-/nanofibers. Thirdly, we introduce the principle and techniques of high-precision diameter control in glass micro-/nanofiber fabrication based on a *in-situ* feedback from the cutoff of high-order waveguiding modes, which can offer a diameter precision down to nanometer level. In addition, several techniques for diameter measurement of a micro-/nanofiber are also introduced. Finally, we end the review with a brief summary in micro-/nanofiber fabrication, as well as an outlook to future possibilities.

micro-/nanofibers, high-precision fabrication, diameter control

PACS: 42.70.Ce, 42.81.-i, 42.81.Bm, 42.81.Cn, 42.81.Dp

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0027](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0027)