

微纳光纤技术:近期研究进展

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, 浙江 杭州 310027

摘要 微纳光纤是一种直径接近或小于传输光真空波长的一维自由导波结构,通常由加热玻璃光纤在高温下通过物理拉伸方法制备。典型的微纳光纤具有表面光滑、直径均匀、力学性能优良、强光场约束、强倏逝场、表面场增强及直径/波长依赖的大波导色散等特性,而且光传输损耗远低于同等直径/线宽的所有其他形式的微纳光波导,在光学近场耦合、传感、原子光学、非线性光学及光纤激光技术、光力操控等领域具有良好的应用前景。本文基于微纳光纤的基本传输特性,介绍近年来本研究组在微纳光纤的精确制备、近场耦合、传感与非线性器件等方面的主要研究进展,同时简要提及国内外其他研究组同期相关工作,最后对该方向的研究进行简要总结与展望。

关键词 光纤光学; 微纳光纤; 精确制备; 近场耦合; 传感器; 光调制器; 光纤激光器

中图分类号

文献标志码

DOI: 10.3788/AOS202242.1706001

Recent Progress in Optical Micro/Nanofiber Technology

Tong Limin*

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

Abstract Optical micro/nanofibers are one-dimensional free-standing waveguiding structures with diameters close to or smaller than the vacuum wavelength of the guided light. Fabricated by physically drawing glass fiber at high temperature, these fibers show excellent surface smoothness and diameter uniformity, high mechanical strength, tight optical confinement, strong evanescent field, evident surface field enhancement, and large wavelength/diameter-dependent waveguide dispersion, especially much lower waveguiding loss than all other micro/nanowaveguides with similar geometries. These merits offer them great potentials in applications ranging from near-field optical coupling, optical sensing, atom optics, nonlinear optics, laser technology, and optomechanics. In this review, starting from the basic waveguiding properties of optical micro/nanofibers, we introduce our recent progress in high-precision fiber fabrication and micro/nanofiber-based near-field coupling, optical sensors, and nonlinear optical devices. At same time, we also mention relative works from other groups. Finally, we conclude this article with a brief outlook.

Key words fiber optics; micro/nanofibers; high-precision fabrication; near-field coupling; optical sensors; optical modulators; fiber lasers

1 引言

20世纪60年代玻璃光纤^[1]的发明,极大地提升了人们对光的操控和利用能力。作为典型的光学波导,光纤不仅是光信息器件和系统的基本功能单元之一,也是众多科学研究中光的产生、传输和调控的重要结构和工具,在光通信、传感、激光技术等领域获得了广泛应用^[2]。近年来,随着人们对光的研究和认识的深

入,以及对光纤技术和器件性能要求的不断提高,减小光纤结构及模场尺寸,在更小的空间尺度上提高光纤对光的约束及调控能力,探索光与物质相互作用的新机理、新技术,提升相关器件性能,拓展其应用范围,成为光纤领域的前沿研究方向之一。作为光纤光学与微纳技术的完美结合,微纳光纤是近年发展起来的一种新型微纳导波结构^[3-8]。与标准光纤相比,微纳光纤具有更小的直径(通常接近或小于传输光的真空波长)、

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-07-21; 录用日期: 2022-07-28

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

通信作者: *phytong@zju.edu.cn

更大的纤芯包层折射率差(比如,与空气包层的折射率差约为 0.5),因此具有一些独特的光学传输特性^[9],包括低传输损耗、强光场约束、强倏逝场、表面场增强及直径/波长依赖的大波导色散、微小质量、与标准光纤兼容等。上述特性为基于光纤技术的微尺度高效近场耦合、低功率阈值非线性效应、高灵敏光学传感、短距离高低损耗色散补偿等提出了新的可能。

自首次实现亚波长直径微纳光纤的低损耗传输^[3]以来,本研究组在微纳光纤及其技术应用方向开展了较为系统深入的研究,在基于微纳光纤的制备、近场耦合、光传感、光调制、非线性光学、光纤激光及新型光纤结构探索等方面获得了系列进展。本文首先简要介绍微纳光纤的基本传输特性;然后,以本研究组近年来在微纳光纤技术方向的代表性工作为例,介绍本研究组

在微纳光纤的高精度制备、近场耦合、光学传感、非线性光学与光纤激光器等应用方面的研究进展,并简要提及国内外其他研究组的部分相关工作;最后,进行简要的总结与展望。

2 微纳光纤的基本传输特性

由于微纳光纤直径接近或小于传输光的真空波长,而且芯内外折射率差较大,因此传输光场难以用标量波近似计算,需要通过求解 Maxwell 方程的严格解及结合数值计算来得到传播常数^[9]。从图 1(a)可以看到,对于典型的空气包层石英玻璃微纳光纤:当光纤直径在接近及小于传输光真空波长(此处为 633 nm)的一定范围内,传播常数 β 随直径变化很大;当直径小于单模截止直径(约 450 nm),光纤以单模(HE₁₁基模)工作。

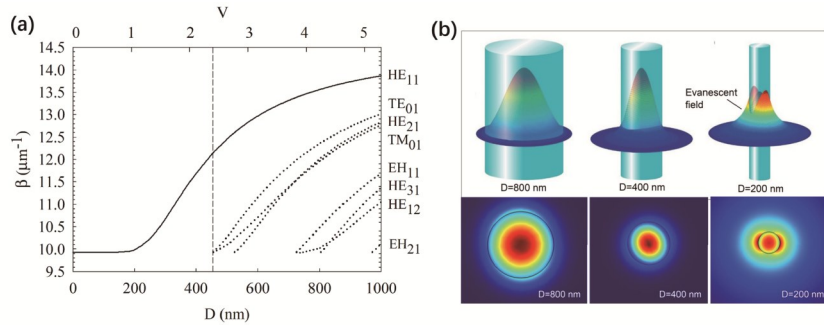


图 1 石英玻璃微纳光纤在空气中传输波长为 633 nm 的光的基本传输特性^[7]。(a)传播常数 β 的理论计算值,其中 D 为光纤直径, V 为归一化传播常数;(b)传输光沿轴向的能量流(坡印亭矢量)分布(上)以及截面光场强度的分布(下)

Fig. 1 Basic optical waveguiding properties of a silica micro/nanofiber at 633 nm wavelength in the air^[7]. (a) Calculated propagation constant β , where D is the fiber diameter and V is the normalized propagation constant; (b) energy flow (Poynting vector) distribution along the axial direction (upper) and the cross-sectional field intensity distribution (lower) of the waveguided light

为了更直观地显示导模光场分布,图 1(b)给出了几种典型直径(800、400、200 nm)的微纳光纤基模光场的空间及截面能量分布(传输光波长为 633 nm)^[7],可看到,随着微纳光纤直径的减小,越来越多的能量以倏逝场的形式分布到围绕光纤表面的外部空间。

上述基本特性结合微纳光纤的低传输损耗、微小质量、与标准光纤兼容等特点,使得微纳光纤具有强光场约束、强倏逝场、表面场增强及直径/波长依赖的大波导色散、灵敏光动量响应及其衍生的一系列独特导波特性和^[2],这为微纳尺度上的光场传输、耦合、调控、光与物质相互作用及其应用提供了新的可能。

3 微纳光纤的高精度制备

微纳光纤的直径、直径均匀度、表面光滑度等结构参数直接影响光纤的传输损耗、倏逝场分布及波导色散等重要光传输特性,特别是在光学近场耦合^[10-12]、非线性光学相位匹配^[13-15]、光传感中倏逝场调控^[16-19]、原子光学中梯度力设计^[20-22]、光力操控^[23-27]等方面,对光纤直径控制精度要求较高。为此,基于光纤中高阶模截止条件与光纤直径的对应关系[图 1(a)],可以在微纳光纤制备过程中引入直径反馈控制^[28],实现微纳光纤的高精度制备。

2017年,本研究组徐颖新等^[29]通过精确测量两个高阶模截止突变点之间的时间间隔,再根据所设的最终目标直径来确定拉伸停止时间,在微纳光纤制备中实现了高精度直径控制,实验测量结果表明,在 800~1300 nm 直径范围内,微纳光纤直径控制精度优于 5 nm(约 0.6%),显著高于此前其他研究组报道的控制精度(约 2%)^[28]。

2020年,为了进一步提高直径控制精度,减小通过计算时间间隔确定拉伸停止时间过程中非实时操作产生的误差,本研究组康仪等^[30]提出使用宽带传输光结合光纤光谱仪快速测量高阶模截止点,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(约 0.3%)(图 3)。

2020年,本研究组姚妮等^[31]通过控制微纳光纤的锥角、抑制拉锥区能量从基模转化到容易泄漏的高阶模,利用高精密平移台带动光纤扫描代替火焰扫描来稳定火焰加热区,在低损耗超长微纳光纤高精度制备方面也取得了较好的进展——制备出 10 cm 长度、1.2 μm 直径的微纳光纤,经实验测量,1550 nm 波长的入射光在经历“标准光纤-微纳光纤-标准光纤”传输后的总透过率达到 99.4%(即 < 0.03 dB)。

另外,针对实际应用中常规环境(非电镜真空环

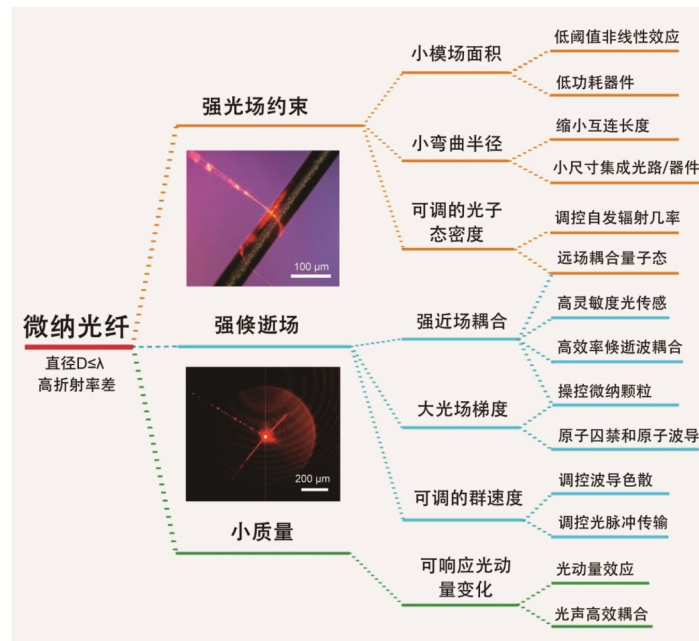


图 2 微纳光纤的光学特性及相关应用^[7]

Fig. 2 Optical properties and applications of optical micro/nanofibers^[7]

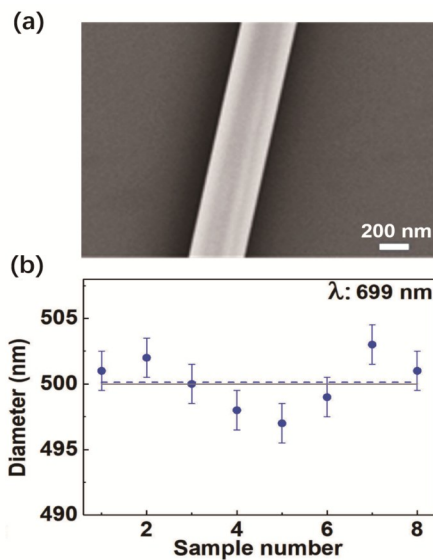


图 3 基于高阶模截止反馈控制的高精度微纳光纤制备^[30]。(a)所拉制的典型微纳光纤的电镜照片;(b)预设目标直径为 500 nm 的微纳光纤拉制结果,其中蓝色圆点为实验测量的直径值,虚线为实验测量平均值,实线为目标值,699 nm 为 500 nm 直径微纳光纤 TE01 模截止时对应的波长

Fig. 3 Preparation of high-precision optical micro/nanofibers based on high-order mode cutoff feedback control^[30]. (a) SEM image of a typical optical micro/nanofiber; (b) optical micro/nanofiber drawing results with a preset target diameter of 500 nm. The blue dots stand for diameter value of the experimental measurement, the dashed line stands for average value of the experimental measurement, and the solid line stands for the target value. 699 nm is the wavelength corresponding to the cutoff of TE01 mode of a 500 nm diameter micro/nanofiber

境)下的微纳光纤非破坏式在线直径测量,在早期圆柱衍射法^[32]、光纤侧面扫描法^[33]、高次谐波法^[34]及光子晶体微腔耦合法^[35]等方法的基础上,近年来国内外多个研究组还发展了模式演化短时傅里叶变换法^[36]、液体浸没法^[37]以及倏逝场微尘散射^[38]等新方法。其中,华东理工大学激光物理与量子调控研究团队提出倏逝场微尘散射方法^[38]:利用飞瓦探测器及透镜收集系统远场测量微纳光纤导模倏逝场中的微尘光散射强度,获得微纳光纤直径与散射光强对应的洛伦兹拟合公式,并将该公式用于微纳光纤制备中的反馈控制,在 400~750 nm 直径范围内,测量及控制精度和准确度分别达到 3 nm 和 10 nm,具有设备简单、可远场工作、实时无损测量等优势。目前,微纳光纤的直径控制精度已经能够满足绝大部分研究或应用需求,进一步改进加热温区的稳定性、优化温区温度分布,以及提高机械扫描拉伸方式的运行和反馈控制精度,有望进一步提高直径均匀度和控制精度,以及单模工作时“标准光纤-微纳光纤-标准光纤”的总体透过率。

4 微纳光纤近场耦合技术

微纳光纤的大比例倏逝场[图 1(b)]非常适合于微尺度上的高效率近场耦合^[10],此前已经基于微纳光纤实现了高分子纳米光纤^[39-41]、银纳米线表面等离子激元波导^[11,42-43]、半导体纳米线^[44-46]等微纳光波导的高效输入/输出。近年来,考虑到光子集成芯片互连及片上器件的光纤输入输出需求,进一步对微纳光纤与片上功能结构的近场耦合开展了较为深入的研究,并发展了相关器件应用技术。

通常,石英微纳光纤由于材料折射率较低(1550 nm 波段材料折射率约为 1.44),为了实现其与硅基波导(1550 nm 波段材料折射率约为 3.48)的直接

耦合,必须将硅基波导悬空^[47],这将显著增加制备难度、结构复杂度及不稳定性。2017年,本研究组陈必更等^[48]在成功实现高折射率半导体纳米线与硅基波导面内高效耦合的基础上,使用高温拉伸制备的Er³⁺/Yb³⁺共掺高折射率碲酸盐玻璃微纳光纤(1550 nm波段材料折射率约为2.1),与硅基微环腔一侧的波导顶边平行耦合,将微纳光纤中Er³⁺离子在1550 nm波段的宽带荧光有效耦合到硅基微环腔(图4)。2020年,本研究组姚妮等^[49]通过优化模场匹配,使用1.4 μm直径的微纳光纤与片上砷酸锂薄膜波导[双折射材料,折

射率分别为2.211(o光)、2.138(e光)]进行端对端耦合,在1550 nm波段实现了TE及TM模分别约为1.32 dB和1.88 dB的实验耦合损耗,考虑到理论耦合损耗最低可达0.32 dB(TE模)和0.86 dB(TM模),耦合效率还可以进一步提高。上述工作为微纳光纤与平面波导的高效直接耦合提供了可行的方案。另外,由于标准光纤到微纳光纤的耦合效率很高(单次耦合最高效率>99%),基于微纳光纤的近场耦合技术也为标准光纤与硅光波导等平面波导的高效耦合提供了新思路。

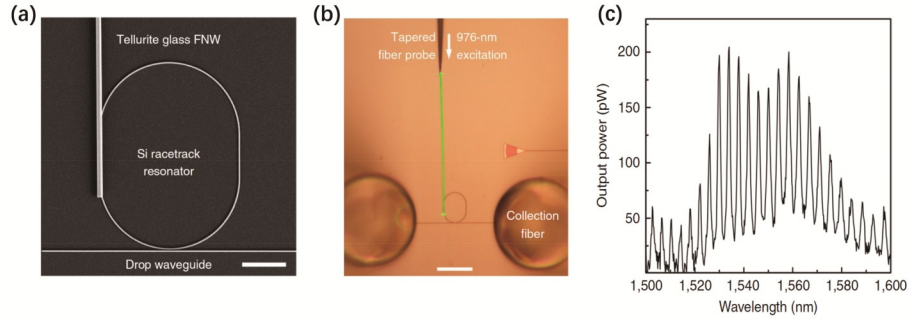


图4 Er³⁺/Yb³⁺共掺高折射率碲酸盐玻璃微纳光纤与硅基微环腔一侧的波导顶边平行耦合^[48]。(a)耦合结构的电镜照片;(b)耦合结构的光学显微镜照片,其中碲酸盐玻璃微纳光纤的绿色荧光来自976 nm波长激光激发下的Er³⁺上转换发光;(c)碲酸盐玻璃微纳光纤中Er³⁺离子在1550 nm波段的宽带荧光耦合进入硅基微环腔后,从底部水平波导耦合输出的荧光光谱

Fig. 4 On-top parallel coupling of an Er³⁺/Yb³⁺ co-doped high refractive index tellurite glass micro/nanofiber and one side of a silicon-based microring cavity^[48]. (a) SEM image of the coupling structure; (b) optical microscope image of the coupling structure, in which the green fluorescence of the tellurite glass micro/nanofiber comes from up conversion luminescence of Er³⁺ ions excited by a 976 nm light; (c) broadband photoluminescence spectrum of Er³⁺ ions in a tellurite glass micro/nanofiber coupled out from the bottom horizontal drop waveguide, after circulating in the silicon-based microring cavity around 1550 nm band

在片上器件的光纤耦合方面,2017年本研究组与中国科学院上海微系统与信息技术研究所尤立星研究组合作,将“标准光纤-微纳光纤-NbN纳米线”级联耦合方式[图5(a)]代替原先基于平面波导的耦合结构,用于超导纳米线单光子探测器(SNSPD)的光输入。由于标准光纤与微纳光纤之间的近绝热模场过渡效率很高(>95%),微纳光纤的表面倏逝场在传输过程中与NbN纳米线相互作用的距离较长,在1064 nm和

1550 nm的入射波长下分别实现了50%和20%的总体探测效率^[50-51]。2019年,中国科学院上海微系统与信息技术研究所侯昕彤等^[52]通过进一步优化耦合结构和相互作用光场分布,将微纳光纤放置在超导NbN纳米线顶部耦合[图5(b)、(c)],适用于630~1500 nm宽带光谱范围内的高效耦合,在785 nm和1550 nm处分别实现了66%和45%的总体探测效率,为具有量子极限灵敏度的超宽带弱光探测提供了可能。

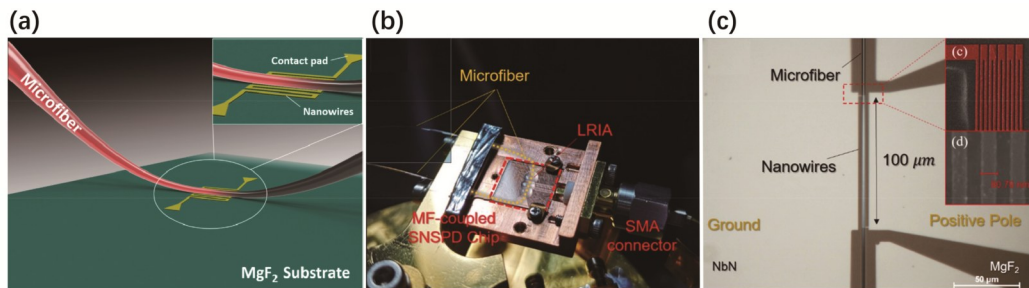


图5 基于微纳光纤近场耦合光学输入的超导纳米线单光子探测器(SNSPD)^[51-52]。(a)微纳光纤与超导纳米线近场耦合示意图;(b)基于微纳光纤耦合的超导纳米线单光子探测器芯片模块照片;(c)微纳光纤与超导NbN纳米线顶部耦合光学显微镜照片

Fig. 5 Superconducting nanowire single photon detector (SNSPD) based on near-field coupling optical input of a micro/nanofiber^[51-52]. (a) Schematic of near-field coupling between a micro/nanofiber and a superconducting nanowire; (b) photo of a micro/nanofiber coupled on-chip SNSPD module; (c) optical microscope image of a micro/nanofiber on-top coupled superconductor nanowire

2015年,本研究组王攀等^[53]利用微纳光纤截面支持的高质量回音廊模式(WGM)^[54],实现了金属纳米

棒中局域表面等离子元共振模(LSPR)与回音廊模的强耦合,显著延长了局域表面等离子元共振模的相干

弛豫时间。2018年,德国 Stuttgart 大学 Giessen 研究组^[55]基于上述金纳米颗粒与微纳光纤强耦合结构,在 100 fs 激光脉冲激发下,实现了强度增强 1000 倍左右的超窄线宽二倍频产生。2021年, Giessen 研究组^[56]通过进一步优化微纳光纤与金纳米颗粒的结构参数,使得基频与二倍频同时满足耦合腔共振条件,实现了双共振条件下强度增加 5 个数量级的超窄线宽二倍频产生。2022年,本研究组周宁等^[57]利用荧光分子掺杂的聚合物微纳光纤与金纳米颗粒的强耦合模式,实现了复合“光子-表面等离子激元”激光器,这是第一个从单个金属纳米颗粒上获得该类结构激光信号的实验结果。

此外,结合微纳光纤的强倏逝场与光纤光栅、共振腔等功能结构,国内外多个研究组报道了微纳光纤耦合量子点^[58]、金刚石色心^[59]以及单分子结构^[60]等微纳复合体系的研究工作,以及用于腔量子电动力学研究的微纳光纤结构设计与制备^[61-62]。

基于微纳光纤的近场耦合技术具有与标准光纤耦合效率高、结构紧凑简单、真空兼容、可柔性连接等优点,在“光纤-芯片”“芯片-芯片”互连、固态量子纳米光子学器件等方面具有良好的应用前景,未来需要进一步研究的内容包括如何提高微纳光纤与平面波导高效率耦合的带宽和偏振可控性、如何制备等效折射率与片上波导折射率匹配的微纳光纤、如何实现该类耦合

结构的封装等等。

5 微纳光纤传感器

微纳光纤所支持的大比例倏逝场空间分布及能量泄漏对周围环境折射率的改变非常敏感,为高灵敏光学传感应用提供了独特优势,因此,光学传感应用一直是微纳光纤技术中被研究和关注最多的方向之一^[63-67]。

此前,科研人员在微纳光纤折射率传感模型^[16],以及基于微纳光纤的浓度、温度、湿度、气体、生物、化学、电流等传感技术方面开展了比较深入的研究^[64-65,67],发展了多种针对特定应用的可拓展微纳光纤传感结构的实验方法。近年来,针对机器人控制、人机交互及医疗健康等领域对高灵敏、可穿戴式传感器的需求,本研究组在之前的基础上重点开展了可穿戴式微纳光纤触觉、温度、硬度等传感技术研究,显示出高灵敏、快响应、高分辨等优良特性。

针对“电子皮肤”触觉传感器在某些应用中存在易受电磁干扰、响应速度受限等方面的问题,2020年本研究组张磊等^[68]提出基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)包裹微纳光纤形成复合薄膜传感功能结构——“光学皮肤”,成功研制出可穿戴的微纳光纤触觉传感器(图6)。利用微纳光纤微弯及 PDMS 薄膜形变折射率

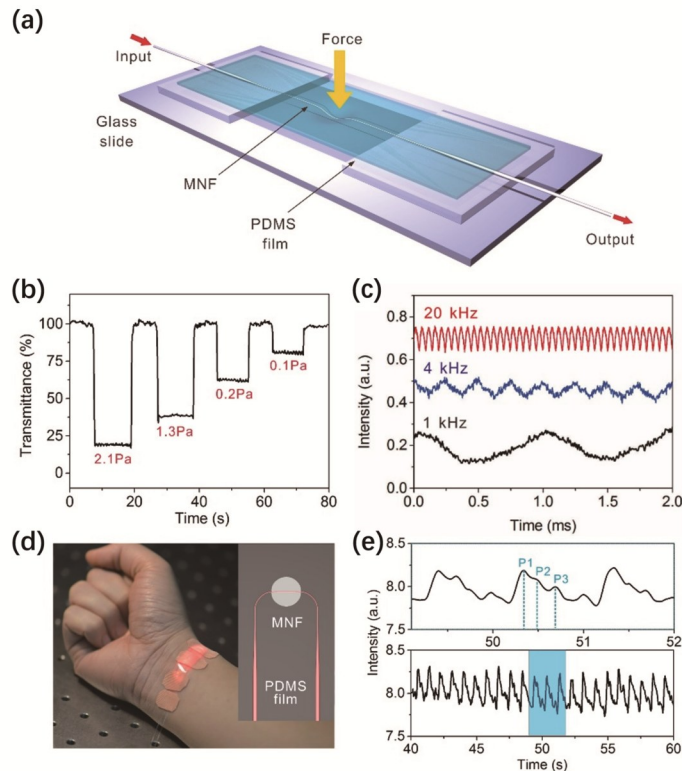


图6 微纳光纤“光学皮肤”可穿戴触觉传感器^[68]。(a)传感器结构示意图;(b)传感器分别对 2.1、1.3、0.2、0.1 Pa 的响应测试结果;(c)传感器分别对 1、4、20 kHz 机械振动的响应测试结果;(d)传感器用于脉搏测量时贴附于手腕上的照片;(e)每分钟 66 次的脉搏测试实验结果

Fig. 6 Micro/nanofiber-based wearable "optical skin" tactile sensors^[68]. (a) Schematic of the sensor structure; (b) response test results of the sensor to 2.1, 1.3, 0.2, 0.1 Pa, respectively; (c) response test results of the sensor to mechanical vibration of 1, 4, 20 kHz, respectively; (d) photo of attaching the sensor on a wrist for pulse measurement; (e) pulse test results of 66 times per minute

变化引起的导模倏逝场能量变化,实现了高灵敏(灵敏度高达 1870 kPa^{-1} , 检出下限低至 7 mPa)、快响应(响应时间小于 $10 \mu\text{s}$)的触觉、脉搏、呼吸传感器,为生理指标监测、机械手远程操控、新型触觉感知等提供了新途径。

为了扩展“光学皮肤”的灵活拉伸特性,2020年本课题组潘婧等^[69]将包埋在PDMS薄膜中的微纳光纤进行预弯曲,以增加可拉伸长度及扩展可测量范围

[图7(a)、(b)],通过检测薄膜拉伸引起光纤弯曲曲率变化导致的倏逝场能量变化(体现为微纳光纤中信号光强度的变化),实现该可穿戴传感器对手臂运动、拉伸、呼吸、语音等的灵敏检测。同时,基于PDMS材料显著的热光效应(折射率随温度变化),实现高灵敏“光学皮肤”温度传感器[图7(c)、(d)],在 $35\sim 41^\circ\text{C}$ 的典型体温范围内,实测温度分辨率达到 0.01°C 。

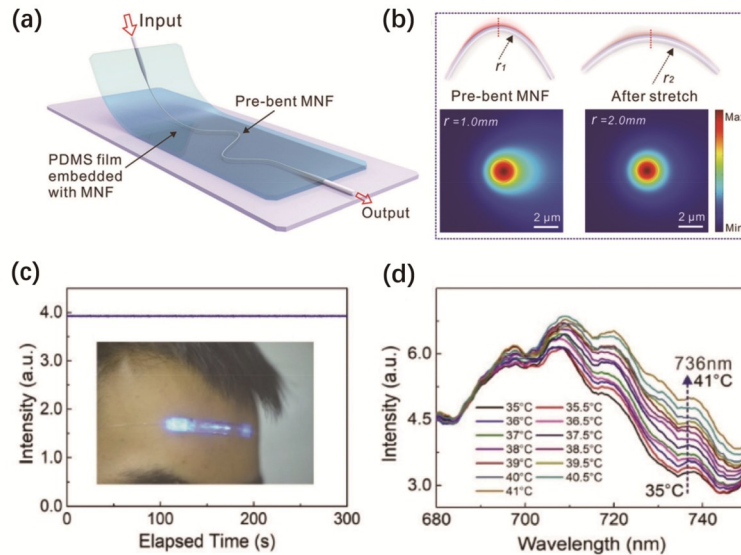


图7 预弯曲微纳光纤“光学皮肤”可穿戴传感器^[69]。(a)传感器结构示意图;(b)传感器被拉伸前与拉伸后微纳光纤中截面模场强度分布的对比图;(c)将传感器贴在额头表面用于体温测量的实验结果与实物照片;(d)传感器在油浴中测量不同温度时的输出光谱
Fig. 7 Pre-bent micro/nanofiber-based wearable "optical skin" sensors^[69]. (a) Schematic of the sensor structure; (b) comparison of the cross-section modal field intensity distribution of a micro/nanofiber before and after being stretched; (c) experimental results and real-device photo of attaching the sensor onto the forehead surface for body temperature measurement; (d) output spectra of the sensor measuring different temperatures in an oil bath

此外,之江实验室蒋程鹏等^[70]将微纳光纤“光学皮肤”与仿制的指尖纹路结构结合,成功研制出同时具有抓取力传感和滑动检测功能的柔性触觉传感器,实现了机械手的触觉反馈和灵巧操作。本课题组唐瑶等^[71]将U型弯曲微纳光纤封装在半球形PDMS微型探头中,实现了可用于微创手术中组织硬度区分的新型触觉传感器,有望为组织触诊、手术机器人和物体识别中的硬度传感提供光学解决方案。本课题组张璋等^[72]成功研制出同时具有感知风速和风向的气流传感器,实现了人体呼吸特征的实时监测。之江实验室刘海涛等^[73]成功研制出同时具有湿度和压力感知能力的微纳光纤传感器,实现了接触过程中手指接近、接触、离开的全过程实时监测。之江实验室马庶祺等^[74]研制出基于微纳光纤阵列传感器的新型人机交互界面,实现了虚实融合的人机交互。

国内外还有多个研究组在基于微纳光纤的手指运动识别^[75]、脉搏及血压测量^[76]、温湿度检测^[77]等可穿戴传感器,以及有望实现诊疗一体化的生物传感器^[78]、高灵敏超声检测与成像^[79]等方面取得重要进展。特别是,2019年暨南大学关柏鸥和黄赞赞研究组^[78]在微纳光纤表面修饰“纳米金片/黑磷”局域表面等离子体共

振结构,增强光纤倏逝场与待测样品之间的相互作用,实现了乳腺癌标志物 ErbB_2 的单分子检测,并利用其对 ErbB_2 目标分子特异性响应,使用“纳米金片/黑磷”复合结构的光热效应来杀死癌细胞,不仅突破了光纤生物传感器的灵敏度瓶颈问题,而且为光纤单分子检测及细胞水平的诊疗一体化开辟了一种可能的途径;2022年,华中科技大学孙琪真研究组^[79]利用微纳光纤倏逝场对外界环境的敏感特性,通过优化微纳光纤直径、高弹光系数材料封装技术并构建 Mach-Zehnder 干涉结构解调光相位变化,实现了高灵敏超声检测,其灵敏度相比于普通光纤提升了一个数量级,并首次将微纳光纤传感器拓展到光声成像领域。

总的来说,近年来微纳光纤传感器的发展趋势一是从传感机理、结构模型等应用基础研究向针对应用需求的传感技术发展;同时,突破已有传感器结构的限制、探索传感性能极限,也是微纳光纤传感技术的新前沿。

6 非线性及超快光子器件

微纳光纤与空气包层之间的大折射率差使得传输模场具有强光场约束、小模场面积、表面场增强、直径/

波长依赖的大波导色散等特点,在增强光与物质相互作用及光学非线性效应方面具有特殊优势^[9,80]。此前,多个研究组已经报道了基于微纳光纤的超连续光谱产生^[81-82]、非线性频率转换^[83-84]、自相位调节^[85]等结果,显示出功率阈值低、色散调控灵活、表面二次谐波显著等优点。近年来,本课题组的工作主要集中在超快全光调制、锁模光纤激光器等非线性及超快光子器件应用方面。

由于石英玻璃(氧化硅)的非线性系数较小,要获得器件应用所需的非线性效应往往需要较长的距离或者较高的峰值功率,限制了器件尺寸或功率阈值的降低。因此,为了在较小尺寸、较低功率下获得显著的非线性效应,需要增加额外的高非线性系数的材料。石墨烯等二维材料是一种三阶非线性系数很高的微纳光学材料^[86],而微纳光纤的强表面倏逝场可与附着在光纤表面的石墨烯进行很好的耦合及

相互作用,因此,可通过在微纳光纤表面包覆石墨烯薄膜形成高非线性系数的微纳光纤复合结构。2014年,本课题组与复旦大学刘韡韬研究组^[87]合作,首次将双层石墨烯转移到 1.4 μm 直径的微纳光纤表面,形成高非线性系数的“石墨烯-微纳光纤”复合结构[图 8(a)],将 1550 nm 波长的信号光与 789 nm 波长的调制光脉冲同时耦合进入微纳光纤,并传输经过 20 μm 长度的石墨烯包覆区域,基于调制光脉冲对石墨烯饱和吸收效应的调控,实现 1550 nm 波段响应时间约为 2 ps、调制能量约为 1 pJ/pulse 的全光纤超快全光调制器,在调制速度、插入损耗等方面优于此前报道的石墨烯电光调制器^[88]。随后,本课题组尝试将石墨烯掺杂于聚合物微纳光纤中,进一步将调制能量降低到 0.2 pJ/pulse^[89],以及通过 Mach-Zehnder 光纤干涉结构[图 8(b)],大幅度提高了调制深度与整体透过率^[90]。

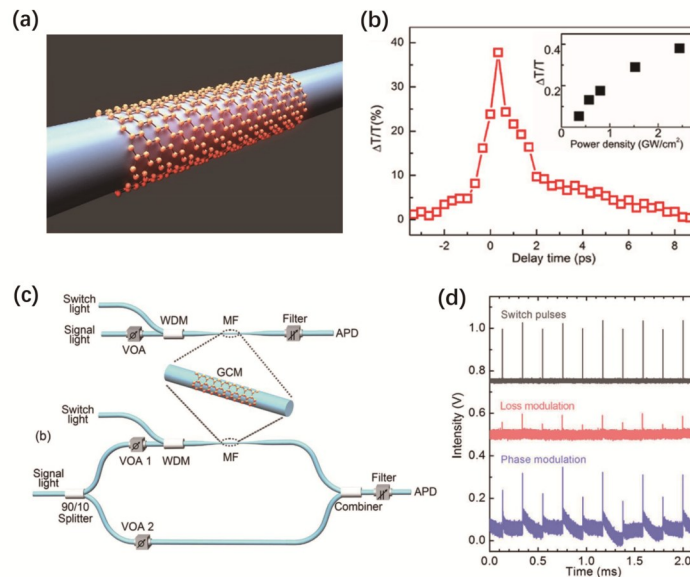


图 8 “石墨烯-微纳光纤”复合结构全光超快调制器^[87,90]。(a)石墨烯包覆的微纳光纤(GCM)结构示意图;(b)泵浦-探测法响应时间测试结果(光纤直径为 1.4 μm 、GCM 长度为 20 μm 、泵浦光功率为 200 nW 时测得的响应时间约为 2.2 ps),插图显示了调制深度与泵浦光强度的关系;(c)基于 GCM 的两种全光调制结构示意图,其中上图所示为基于吸收损耗的调制结构,下图所示为基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉器的光学相位调制结构;(d)基于 GCM 的两种全光调制结构实验测试结果,其中上图所示为强度不同的调制脉冲对,中图所示为基于吸收损耗结构的调制结果,下图所示为基于光学相位调制结构的调制结果

Fig. 8 All-optical ultrafast modulator based on hybrid "graphene-micro/nanofiber" structure^[87,90]. (a) Schematic of the graphene-coated micro/nanofiber (GCM) structure; (b) response time test results of pump-probe technique (the fiber diameter is 1.4 μm , the GCM length is 20 μm , and the response time is ~ 2.2 ps when the pump power is 200 nW), and the inset shows the dependence of the modulation depth on the pump intensity; (c) schematic of two types of all-optical modulation structures based on GCM (top: modulation structure based on absorption loss; bottom: optical phase modulation structure based on an all fiber Mach-Zehnder interferometer); (d) experimental results of all-optical modulation based on two types of GCM structures (top: pump pulse pairs with different intensities; middle: modulation results based on absorption structure; bottom: modulation results based on phase modulation structure)

同时,微纳光纤所具有的直径/波长依赖的大波导色散特性,结合标准光纤与微纳光纤之间的高效率近绝热模场过渡,为光纤激光腔提供了一种附加长度短、插入损耗低、色散补偿范围大的色散调控方案^[91]。2018年,本课题组王利镇等^[92]在非线形偏振演化的

1 μm 波段掺镱锁模光纤激光器中,使用直径为 1 μm 、长度为 25 cm、1 μm 波段色散为 -120 ps²/km 的微纳光纤作为色散调控结构,接入激光腔的插入损耗仅为 0.06 dB(对应的透射率为 98.6%),在光输出端使用另一段微纳光纤进行光谱展宽与脉冲压缩,获得平均

功率为 60 mW、重复频率为 120 MHz、光谱中心波长为 1048 nm、脉冲时域宽度为 110 fs 的单脉冲输出(图 9)。值得一提的是,西安电子科技大学和中国科学院物理研究所合作,利用类似的微纳光纤色散调控方案,在 1045 nm 中心波长处获得了平均功率为 28 mW、重复频率为 66.1 MHz、脉冲宽度仅为 65 fs 的锁模脉冲输出^[93]。

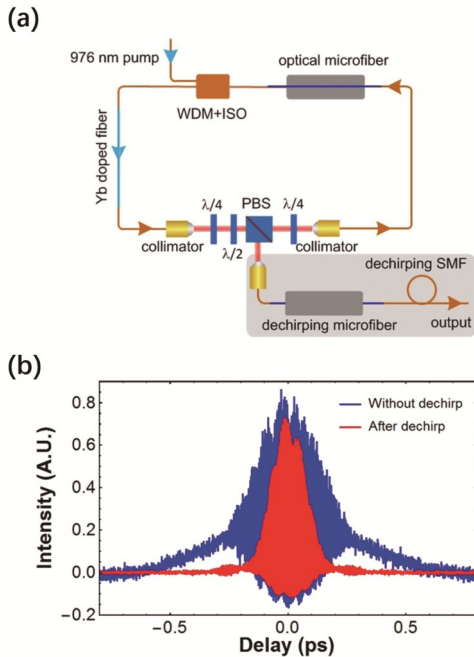


图 9 基于微纳光纤色散调控的锁模光纤激光器^[92]。(a)基于腔内微纳光纤色散调控、腔外微纳光纤和单模光纤去啁啾的 1 μm 波段锁模光纤激光器结构示意图;(b)腔外去啁啾后的自相关曲线与去啁啾前的自相关曲线对比

Fig. 9 Mode-locked fiber laser based on micro/nanofiber dispersion management^[92]. (a) 1 μm mode-locked fiber laser based on intracavity micro/nanofiber dispersion management, extra-cavity dechirping micro/nanofiber and single-mode fiber; (b) comparison of extra-cavity autocorrelation curves after and before dechirping

上述方案还被拓展到其他波段的锁模光纤激光器中。2018年,清华大学李宇航等^[94]使用直径为 1 μm 、长度为 10 cm 的微纳光纤来补偿掺铥锁模光纤激光器中的负色散,在 2 μm 波段获得重复频率为 49 MHz、脉冲宽度为 195 fs 的锁模脉冲输出。

另外,微纳光纤与二维材料、无机层状结构及水等复合形成的结构还被用于脉冲整形、光信号处理、电光调制及新型功能材料探索等方面^[95-101]。在微纳光纤与二维材料复合结构功能探索方面:南京大学徐飞与陆延青研究团队^[95]将单层单晶 WS_2 薄膜可控转移到石英微纳光纤表面,实现了复合波导在近红外波段的低损耗光传输(约 1 dB),发现波导耦合的 WS_2 激子共振吸收强度比自由空间耦合提高了 6 倍以上;上海理工大学谷付星研究组^[96]利用微纳光纤表面悬挂键调控复合在其表面的单层 MoS_2 中的电子密度,使得 MoS_2 荧光

量子产率提高 2 个数量级以上,并基于该类 MoS_2 /微光纤腔复合结构获得超低阈值的室温激光,为拓展微纳光纤复合功能结构提供了新思路。

上述研究结果表明,作为一种方便灵活、色散可调的光纤兼容结构,微纳光纤及其复合结构在超快全光调制及脉冲整形等光信号处理、光纤激光器及非线性频率转换等超短脉冲产生、非线性材料探索等方面具有良好的应用前景。进一步优化微纳光纤结构、选择合适的复合材料及非线性效应,降低光学损耗、提高调制比、降低功率阈值及缩短整体响应时间,同时解决光纤封装及长期稳定工作等问题,将更有利于其在非线性及超快光子器件应用方面向实用化发展。

7 其他方向进展

除了上述 4 个方面,近年来,微纳光纤技术在原子光学^[102-105]、光力操控^[27, 106-110]与光声相互作用^[111-114]、功能化传感结构^[115-120]及海水多参量传感^[121-127]等方面取得了显著进展,特别是在原子光学领域,微纳光纤逐渐发展成为一种基于倏逝场操控冷原子的多功能研究平台^[8]。上述研究近年来都已有相关综述文章^[8, 66-67, 128-129]进行了总结分析,这里不再详述。

8 总结与展望

总的来说,近年来科研人员在微纳光纤制备及器件应用等方面取得了多项进展,主要包括:1)微纳光纤的高精度制备。在拉制过程中引入高阶模截止实时反馈,实现了 ± 2 nm 的超高直径控制精度(对应的直径不确定度约为 0.3%)。2)微纳光纤近场耦合技术。将微纳光纤近场耦合技术用于硅光芯片、超导单光子探测器等片上结构,实现了微纳光纤硅光波导的高效率耦合及超导单光子探测器的宽带高效光纤输入。3)微纳光纤传感器。提出利用聚合物薄膜包埋的微纳光纤“光学皮肤”可穿戴式传感器,实现了具有高灵敏、快响应、抗电磁干扰等特性的触觉、温度、硬度、脉搏、呼吸等柔性光学传感器。4)超快非线性光子器件。基于微纳光纤倏逝场的灵活色散调控及与表面材料的高效相互作用,实现超快全光调制器及色散补偿锁模光纤激光器。

同时,国内外很多研究组在上述方向及原子光学、光力操控、多功能光纤传感等方面也取得了显著进展,为微纳光纤技术的拓展应用打下了良好的基础。另外,上述研究中形成的多学科交叉融合也为下一步研究提出了新的思路。比如:在新型微纳光纤结构方面,除了玻璃、聚合物等常用材料,在低温下生长的可灵活弯曲的冰微纳光纤^[130]在紫外低损耗导波、光学传感等方面具有潜在优势;利用微纳光纤传感过程的形变改变传输光信号的“逆过程”——传输光改变形变,成功研制出微纳光纤光致驱动器^[131],显著提高了光波导型光致驱动器的变形能力和响应速度,实现了对物体的精确快速抓取、转移和操控。

展望未来,基于微纳光纤独特的光学导波特性和

小尺度、高灵活度等优势,以及已有的研究基础,微纳光纤技术有望在新材料探索、原子/量子光学等前沿研究方向,以及光学近场耦合、光学传感、有源与非线性及量子微纳光子器件、光力操控等应用技术方面取得新的进展。

参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Murata H. Handbook of optical fibers and cables[M]. New York: Marcel Dekker, 1996.
- [3] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. Nature, 2003, 426(6968): 816-819.
- [4] Tong L M, Sumetsky M. Subwavelength and nanometer diameter optical fibers[M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [5] Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review[J]. Journal of Optics, 2010, 12(4): 043001.
- [6] Tong L M, Zi F, Guo X, et al. Optical microfibers and nanofibers: a tutorial[J]. Optics Communications, 2012, 285(23): 4641-4647.
- [7] 伍晓芹, 王依霏, 童利民. 微纳光纤及其应用[J]. 物理, 2015, 44(6): 356-365.
Wu X Q, Wang Y P, Tong L M. Optical microfibers and their applications[J]. Physics, 2015, 44(6): 356-365.
- [8] Nayak K P, Sadgrove M, Yalla R, et al. Nanofiber quantum photonics[J]. Journal of Optics, 2018, 20(7): 073001.
- [9] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [10] Huang K J, Yang S Y, Tong L M. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires[J]. Applied Optics, 2007, 46(9): 1429-1434.
- [11] Guo X, Qiu M, Bao J M, et al. Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits[J]. Nano Letters, 2009, 9(12): 4515-4519.
- [12] Shao L Q, Xu Y X, Wu H, et al. Experimental demonstration of a compact variable single-mode fiber coupler based on microfiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(14): 687-690.
- [13] Foster M A, Moll K D, Gaeta A L. Optimal waveguide dimensions for nonlinear interactions[J]. Optics Express, 2004, 12(13): 2880-2887.
- [14] Foster M A, Turner A C, Lipson M, et al. Nonlinear optics in photonic nanowires[J]. Optics Express, 2008, 16(2): 1300-1320.
- [15] Lægsgaard J. Modeling of nonlinear propagation in fiber tapers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(11): 3183-3191.
- [16] Lou J Y, Tong L M, Ye Z Z. Modeling of silica nanowires for optical sensing[J]. Optics Express, 2005, 13(6): 2135-2140.
- [17] Zhang L, Wang P, Xiao Y, et al. Ultra-sensitive microfiber absorption detection in a microfluidic chip[J]. Lab on a Chip, 2011, 11(21): 3720-3724.
- [18] Guo X, Ying Y B, Tong L M. Photonic nanowires: from subwavelength waveguides to optical sensors[J]. Accounts of Chemical Research, 2014, 47(2): 656-666.
- [19] 许悦, 张磊, 童利民. 光流控微纳光纤传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170614.
Xu Y, Zhang L, Tong L M. Optofluidic micro-nanofiber sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170614.
- [20] Balykin V I, Hakuta K, Le Kien F, et al. Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber [J]. Physical Review A, 2004, 70(1): 011401.
- [21] Le Kien F, Balykin V I, Hakuta K. Atom trap and waveguide using a two-color evanescent light field around a subwavelength-diameter optical fiber[J]. Physical Review A, 2004, 70(6): 063403.
- [22] Nayak K P, Hakuta K. Single atoms on an optical nanofiber[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(5): 053003.
- [23] Brambilla G, Xu F. Adiabatic submicrometric tapers for optical tweezers[J]. Electronics Letters, 2007, 43(4): 204-205.
- [24] She W L, Yu J H, Feng R H. Observation of a push force on the end face of a nanometer silica filament exerted by outgoing light[J]. Physical Review Letters, 2008, 101(24): 243601.
- [25] Yu H K, Fang W, Gu F X, et al. Longitudinal Lorentz force on a subwavelength-diameter optical fiber[J]. Physical Review A, 2011, 83(5): 053830.
- [26] Luo W, Xu F, Lu Y Q. Reconfigurable optical-force-drive chirp and delay line in micro- or nanofiber Bragg grating[J]. Physical Review A, 2015, 91(5): 053831.
- [27] Zhang Y, Zhu W G, Fan P P, et al. A broadband and low-power light-control-light effect in a fiber-optic nano-optomechanical system[J]. Nanoscale, 2020, 12(17): 9800-9809.
- [28] Yu Y, Zhang X L, Song Z Q, et al. Precise control of the optical microfiber tapering process based on monitoring of intermodal interference[J]. Applied Optics, 2014, 53(35): 8222-8228.
- [29] Xu Y X, Fang W, Tong L M. Real-time control of micro/nanofiber waist diameter with ultrahigh accuracy and precision[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10434-10440.
- [30] Kang Y, Gong J, Xu Y X, et al. Ultrahigh-precision diameter control of nanofiber using direct mode cutoff feedback[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(5): 219-222.
- [31] Yao N, Linghu S Y, Xu Y X, et al. Ultra-long subwavelength micro/nanofibers with low loss[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(17): 1069-1072.
- [32] Warken F, Giessen H. Fast profile measurement of micrometer-sized tapered fibers with better than 50-nm accuracy[J]. Optics Letters, 2004, 29(15): 1727-1729.

- [33] Sumetsky M, Dulashko Y. Radius variation of optical fibers with angstrom accuracy[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4006-4008.
- [34] Wiedemann U, Karapetyan K, Dan C, et al. Measurement of submicrometre diameters of tapered optical fibres using harmonic generation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 7693-7704.
- [35] Keloth J, Sadgrove M, Yalla R, et al. Diameter measurement of optical nanofibers using a composite photonic crystal cavity[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 4122-4125.
- [36] Jafari F, Ranjbar-Naeini O R, Zibaii M I, et al. Profilometry of an optical microfiber based on modal evolution[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6607-6610.
- [37] 彭政伟, 张胜海, 苗劲松, 等. 微纳光纤直径测试技术研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(5): 596-600.
Peng Z W, Zhang S H, Miao J S, et al. Research on diameter measurement technology of optical microfiber [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5): 596-600.
- [38] Chen J, Zi X H, Zhang S C, et al. Real-time measurement and control of nanofiber diameters using a femtowatt photodetector[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 12008-12013.
- [39] Gu F X, Zhang L, Yin X F, et al. Polymer single-nanowire optical sensors[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(9): 2757-2761.
- [40] Gu F X, Yu H K, Wang P, et al. Light-emitting polymer single nanofibers via waveguiding excitation[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(9): 5332-5338.
- [41] Meng C, Xiao Y, Wang P, et al. Quantum-dot-doped polymer nanofibers for optical sensing[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(33): 3770-3774.
- [42] Ma Y G, Li X Y, Yu H K, et al. Direct measurement of propagation losses in silver nanowires[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1160-1162.
- [43] Li X Y, Li W, Guo X, et al. All-fiber hybrid photon-plasmon circuits: integrating nanowire plasmonics with fiber optics[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15698-15705.
- [44] 杨青, 楼静漪, 杨德仁, 等. ZnO 纳米线光学特性测试的倏逝波耦合[J]. *半导体学报*, 2006, 27(3): 241-244.
Yang Q, Lou J Y, Yang D R, et al. An evanescent coupling approach for optical characterization of ZnO nanowires[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(3): 241-244.
- [45] Gu F X, Wang P, Yu H K, et al. Optical quenching of photoconductivity in CdSe single nanowires via waveguiding excitation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10880-10885.
- [46] Gu F X, Zhang L, Yu H K, et al. Large defect-induced sub-bandgap photoresponse in semiconductor nanowires via waveguiding excitation[J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(42): 425201.
- [47] Andersson U, Tong L M. Subwavelength-diameter silica wire for light in-coupling to silicon-based waveguide[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(10): 577-579.
- [48] Chen B G, Wu H, Xin C G, et al. Flexible integration of free-standing nanowires into silicon photonics[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 20.
- [49] Yao N, Zhou J X, Gao R H, et al. Efficient light coupling between an ultra-low loss lithium niobate waveguide and an adiabatically tapered single mode optical fiber[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 12416-12423.
- [50] Xu Y X, Wu J J, Fang W, et al. Microfiber coupled superconducting nanowire single-photon detectors[J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 48-52.
- [51] You L X, Wu J J, Xu Y X, et al. Microfiber-coupled superconducting nanowire single-photon detector for near-infrared wavelengths[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31221-31229.
- [52] Hou X T, Yao N, You L X, et al. Ultra-broadband microfiber-coupled superconducting single-photon detector[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25241-25250.
- [53] Wang P, Wang Y P, Yang Z Y, et al. Single-band 2-nm-line-width plasmon resonance in a strongly coupled Au nanorod[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(11): 7581-7586.
- [54] Sumetsky M. Mode localization and the Q-factor of a cylindrical microresonator[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2385-2387.
- [55] Ai Q, Gui L L, Paone D, et al. Ultranarrow second-harmonic resonances in hybrid plasmon-fiber cavities[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(9): 5576-5582.
- [56] Ai Q, Sterl F, Zhang H, et al. Giant second harmonic generation enhancement in a high-Q doubly resonant hybrid plasmon-fiber cavity system[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(12): 19409-19417.
- [57] Zhou N, Yang Y X, Guo X, et al. Strong mode coupling-enabled hybrid photon-plasmon laser with a microfiber-coupled nanorod[J]. *Science Advances*, 2022, 8(27): eabn2026.
- [58] Shafi K M, Nayak K P, Miyanaga A, et al. Efficient fiber in-line single photon source based on colloidal single quantum dots on an optical nanofiber[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(4): 58.
- [59] Tashima T, Takashima H, Takeuchi S. Direct optical excitation of an NV center via a nanofiber Bragg-cavity: a theoretical simulation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27009-27016.
- [60] Skoff S M, Papencordt D, Schaufert H, et al. Optical-nanofiber-based interface for single molecules[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(4): 043839.
- [61] Yalla R, Hakuta K. Design and implementation of a tunable composite photonic crystal cavity on an optical nanofiber[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(11): 187.
- [62] Yalla R, Shafi K M, Nayak K P, et al. One-sided composite cavity on an optical nanofiber for cavity QED [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(7): 071108.
- [63] Zhang L, Lou J Y, Tong L M. Micro/nanofiber optical sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 31-42.
- [64] Lou J Y, Wang Y P, Tong L M. Microfiber optical sensors: a review[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 5823-5844.
- [65] Tong L M. Micro/nanofiber optical sensors: challenges and prospects[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 903.

- [66] Chen J H, Li D R, Xu F. Optical microfiber sensors: sensing mechanisms, and recent advances[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2577-2589.
- [67] Zhang L, Tang Y, Tong L M. Micro-/nanofiber optics: merging photonics and material science on nanoscale for advanced sensing technology[J]. *iScience*, 2020, 23(1): 100810.
- [68] Zhang L, Pan J, Zhang Z, et al. Ultrasensitive skin-like wearable optical sensors based on glass micro/nanofibers [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(3): 21-27.
- [69] Pan J, Zhang Z, Jiang C P, et al. A multifunctional skin-like wearable optical sensor based on an optical micro-/nanofiber[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(33): 17538-17544.
- [70] Jiang C P, Zhang Z, Pan J, et al. Finger-skin-inspired flexible optical sensor for force sensing and slip detection in robotic grasping[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(10): 2100285.
- [71] Tang Y, Liu H T, Pan J, et al. Optical micro/nanofiber-enabled compact tactile sensor for hardness discrimination [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(3): 4560-4566.
- [72] Zhang Z, Kang Y R, Yao N, et al. A multifunctional airflow sensor enabled by optical micro/nanofiber[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2021, 3(6): 359-367.
- [73] Liu H T, Song X D, Wang X Y, et al. Optical microfibers for sensing proximity and contact in human-machine interfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(12): 14447-14454.
- [74] Ma S Q, Wang X Y, Li P, et al. Optical micro/nano fibers enabled smart textiles for human-machine interface [J/OL]. *Advanced Fiber Materials*, 2022[2022-06-01]. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s42765-022-00163-6.pdf>.
- [75] Li Y P, Tan S J, Yang L Y, et al. Optical microfiber neuron for finger motion perception[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4(2): 226-234.
- [76] Zhu H T, Zhan L W, Dai Q, et al. Self-assembled wavy optical microfiber for stretchable wearable sensor[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(11): 2002206.
- [77] Xiang S H, You H, Miao X X, et al. An ultra-sensitive multi-functional optical micro/nanofiber based on stretchable encapsulation[J]. *Sensors*, 2021, 21(22): 7437.
- [78] Li H T, Huang Y Y, Hou G H, et al. Single-molecule detection of biomarker and localized cellular photothermal therapy using an optical microfiber with nanointerface[J]. *Science Advances*, 2019, 5(12): eaax4659.
- [79] Yang L Y, Li Y P, Fang F, et al. Highly sensitive and miniature microfiber-based ultrasound sensor for photoacoustic tomography[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(6): 200076.
- [80] Wu X Q, Tong L M. Optical microfibers and nanofibers [J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 407-428.
- [81] Leon-Saval S G, Birks T A, Wadsworth W J, et al. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides[J]. *Optics Express*, 2004, 12(13): 2864-2869.
- [82] Gattass R R, Svacha G T, Tong L M, et al. Supercontinuum generation in submicrometer diameter silica fibers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9408-9414.
- [83] Grubsky V, Feinberg J. Phase-matched third-harmonic UV generation using low-order modes in a glass micro-fiber[J]. *Optics Communications*, 2007, 274(2): 447-450.
- [84] Ismaeel R, Lee T, Ding M, et al. Nonlinear microfiber loop resonators for resonantly enhanced third harmonic generation[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5121-5123.
- [85] Mägi E C, Fu L B, Nguyen H C, et al. Enhanced Kerr nonlinearity in sub-wavelength diameter As_2Se_3 chalcogenide fiber tapers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(16): 10324-10329.
- [86] Choi H, Borondics F, Siegel D A, et al. Broadband electromagnetic response and ultrafast dynamics of few-layer epitaxial graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(17): 172102.
- [87] Li W, Chen B G, Meng C, et al. Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 955-959.
- [88] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
- [89] Meng C, Yu S L, Wang H Q, et al. Graphene-doped polymer nanofibers for low-threshold nonlinear optical waveguiding[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e348.
- [90] Yu S L, Wu X Q, Chen K R, et al. All-optical graphene modulator based on optical Kerr phase shift[J]. *Optica*, 2016, 3(5): 541-544.
- [91] 王利镇, 李林军, 童利民. 微纳光纤及其锁模激光应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126011.
Wang L Z, Li L J, Tong L M. Optical microfibers and their applications in mode-locked fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126011.
- [92] Wang L Z, Xu P Z, Li Y H, et al. Femtosecond mode-locked fiber laser at 1 μm via optical microfiber dispersion management[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 4732.
- [93] Yang P L, Teng H, Fang S B, et al. 65-fs Yb-doped all-fiber laser using tapered fiber for nonlinearity and dispersion management[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1730-1733.
- [94] Li Y H, Wang L Z, Kang Y, et al. Microfiber-enabled dissipative soliton fiber laser at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6105-6108.
- [95] Chen J H, Tan J, Wu G X, et al. Tunable and enhanced light emission in hybrid WS_2 -optical-fiber-nanowire structures[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 8.
- [96] Liao F, Yu J X, Gu Z Q, et al. Enhancing monolayer photoluminescence on optical micro/nanofibers for low-threshold lasing[J]. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaax7398.
- [97] Wang K, Zheng J L, Huang H, et al. All-optical signal processing in few-layer bismuthene coated microfiber: towards applications in optical fiber systems[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16798-16811.
- [98] Wu Q, Huang W C, Wang Y Z, et al. All-optical

- control of microfiber knot resonator based on 2D Ti_2CT_x MXene[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(7): 1900977.
- [99] Teng P P, Luo M, Yang X H, et al. All-fiber bidirectional optical modulator derives from the microfiber coated with ITO electrode[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2497-2500.
- [100] Wang P F, Li S, Ling F Z, et al. All-optical modulator based on a microfiber coil resonator functionalized with MXene[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102776.
- [101] Liu M, Wei Z W, Luo A P, et al. Recent progress on applications of 2D material-decorated microfiber photonic devices in pulse shaping and all-optical signal processing [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2641-2671.
- [102] Nayak K P, Wang J, Keloth J. Real-time observation of single atoms trapped and interfaced to a nanofiber cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(21): 213602.
- [103] Alampounti A, Jenkins R A, Eriksson S. Magnetically trapped atoms in the vicinity of an optical nanofiber[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(4): 71.
- [104] Stourm E, Lepers M, Robert J, et al. Spontaneous emission and energy shifts of a Rydberg rubidium atom close to an optical nanofiber[J]. *Physical Review A*, 2020, 101(5): 052508.
- [105] Su D Q, Qin X T, Jiang Y, et al. Dark state atoms trapping in a magic-wavelength optical lattice near the nanofiber surface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(2): 020201.
- [106] Yu J H, Chen L H, Dong H Z, et al. Sensing and exploiting static femto-Newton optical forces by a nanofiber with white-light interferometry[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3205-3213.
- [107] Lu J S, Yang H B, Zhou L N, et al. Light-induced pulling and pushing by the synergic effect of optical force and photophoretic force[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(4): 043601.
- [108] Tkachenko G, Toftul I, Esporlas C, et al. Light-induced rotation of dielectric microparticles around an optical nanofiber[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 59-62.
- [109] Su D Q, Solano P, Wack J D, et al. Torsional optomechanical cooling of a nanofiber[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 601-609.
- [110] Linghu S Y, Gu Z Q, Lu J S, et al. Plasmon-driven nanowire actuators for on-chip manipulation[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 385.
- [111] Beugnot J C, Lebrun S, Pauliat G, et al. Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5242.
- [112] Godet A, Ndao A, Sylvestre T, et al. Brillouin spectroscopy of optical microfibers and nanofibers[J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1232-1238.
- [113] Cao M, Huang L, Tang M, et al. Inter-mode forward Brillouin scattering in nanofibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(24): 6911-6917.
- [114] Yang F, Gyger F, Godet A, et al. Large evanescently-induced Brillouin scattering at the surrounding of a nanofiber[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1432.
- [115] Zhang L F, Wang Y, Wu H, et al. A ZnO nanowire-based microfiber coupler for all-optical photodetection applications[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(17): 8319-8326.
- [116] Huang Y Y, Chen P W, Liang H, et al. Nucleic acid hybridization on a plasmonic nanointerface of optical microfiber enables ultrahigh-sensitive detection and potential photothermal therapy[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020, 156: 112147.
- [117] Qi K Y, Zhang Y D, Sun J F, et al. Highly sensitive strain sensor based on a sealed optical microfiber coupler [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 59: 102313.
- [118] Dai M L, Chen Z M, Zhao Y F, et al. State-of-the-art optical microfiber coupler sensors for physical and biochemical sensing applications[J]. *Biosensors*, 2020, 10(11): 179.
- [119] Zhou W C, Wei Y L, Wang Y, et al. Ultrasensitive interferometers based on zigzag-shaped tapered optical microfibers operating at the dispersion turning point[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36926-36935.
- [120] Liang H, Zhou L Y, Chen P W, et al. Optical microfiber with a gold nanorods-black phosphorous nanointerface: an ultrasensitive biosensor and nanotherapy platform[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(22): 8058-8065.
- [121] Liao Y P, Wang J, Yang H J, et al. Salinity sensing based on microfiber knot resonator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2015, 233: 22-25.
- [122] Liao Y P, Wang J, Wang S S, et al. Simultaneous measurement of seawater temperature and salinity based on microfiber MZ interferometer with a knot resonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5378-5384.
- [123] Yu Y, Bian Q, Lu Y, et al. High sensitivity all optical fiber conductivity-temperature-depth (CTD) sensing based on an optical microfiber coupler (OMC)[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2739-2747.
- [124] Zhou L J, Yu Y, Huang H M, et al. Salinity sensing characteristics based on optical microfiber coupler interferometer[J]. *Photonics*, 2020, 7(3): 77.
- [125] Cao L, Yu Y, Xiao M, et al. High sensitivity conductivity-temperature-depth sensing based on an optical microfiber coupler combined fiber loop[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1): 011202.
- [126] Hou Y F, Wang J, Wang X, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature in seawater with PDMS sealed microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(22): 6412-6421.
- [127] Li M W, Yu Y, Lu Y, et al. Optical microfiber all-optical phase modulator for fiber optic hydrophone[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(9): 2215.
- [128] Wu Y, Yao B C, Yu C B, et al. Optical graphene gas sensors based on microfibers: a review[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 941.
- [129] 王姗姗, 肖羽萱, 王晶, 等. 基于干涉型微光纤器件的海水温盐压传感方法研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1306015.

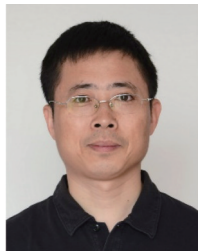
Wang S S, Xiao Y X, Wang J, et al. Development of seawater temperature, salinity and pressure sensing based on interferometric microfiber device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306015.

[130] Xu P Z, Cui B W, Bu Y Q, et al. Elastic ice microfibers

[J]. *Science*, 2021, 373(6551): 187-192.

[131] Xiao J L, Zhou T, Yao N, et al. Optical fibre taper-enabled waveguide photoactuators[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 363.

约稿专家简介:



童利民(1969—),教授,国家杰出青年科学基金获得者,教育部长江学者,美国光学学会会士。1987年进入浙江大学学习,先后获学士(物理学,1991年)、硕士(光学仪器,1994年)及博士(半导体材料,1997年)学位。1997年起留校工作至今,2001—2004年曾在哈佛大学 Mazur 研究组访问进修。2009—2017年曾任浙江大学光电信息工程学系主任、光电科学与工程学院院长,担任 *Chinese Optics Letters*、*Photonic Sensors* 及 *Chinese Physics B* 等期刊编委。长期从事微纳光子学方面的教学及科研工作,主要研究方向包括微纳光子学理论基础、功能结构及器件应用等。发表学术论文 200 余篇,专著 1 部,主持国家级重大、重点项目多项。E-mail: phytong@zju.edu.cn。