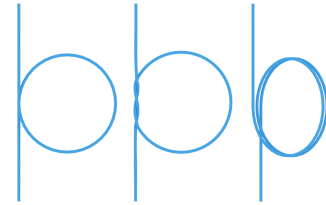


DOI: 10.12086/oe.2022.220006

微光纤光学谐振器的原理与应用

丁梓轩, 陈 烨, 徐 飞*

南京大学现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210023



摘要: 由传统光纤拉锥形成的直径为几百纳米到几微米的微光纤具有大倏逝场、强光场束缚能力、高光学非线性、易于弯曲的可塑性和兼容现有光纤系统的便利性等优势, 为发展小型和功能集成的全光纤器件提供了高自由度的平台。作为基础的光电子器件之一, 光学谐振器在光通信、传感、信号处理、量子光学等领域具有很大的研究价值, 被广泛应用。传统光学微谐振器多基于光刻技术, 制备工艺条件相对复杂。而随着微光纤制备技术的成熟, 基于微光纤的光学谐振器也被提出并逐步发展。微光纤光学谐振器是一种基于倏逝场耦合的近场光学耦合器件, 具有低插入损耗、高精度、易于制造以及与光纤系统良好兼容性等诸多优点, 可应用于滤波器、传感器、光调制器和光纤激光等诸多领域。本文从微光纤光学谐振器的基本原理、器件制备、应用等方面介绍了该领域的相关进展。

关键词: 微光纤; 谐振腔; 光纤传感; 光调制

中图分类号: TN253

文献标志码: A

丁梓轩, 陈烨, 徐飞. 微光纤光学谐振器的原理与应用 [J]. 光电工程, 2022, 49(8): 220006

Ding Z X, Chen Y, Xu F. Optical microfiber resonator: principle and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(8): 220006

Optical microfiber resonator: principle and applications

Ding Zixuan, Chen Ye, Xu Fei*

College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract: Microfibers tapered from conventional optical fibers with diameters ranging from hundreds of nanometers to several micrometers possess various advantages including large evanescent field, strong light confinement, high optical nonlinearity, flexible configurability, and low-loss connection to other fiberized systems, which makes it an open platform for miniaturization and integration of all-fiber devices. As a fundamental opto-electronic component, optical resonators have got comprehensively researched and widely applied in the fields of optical communication, sensing, signal processing, and quantum photonics. Traditional optical resonators are fabricated through lithography which is relatively complicated. With the maturation of microfiber fabrication methods, optical resonator based on optical microfibers was demonstrated and developed. As an optical coupling device based on evanescent field coupling, the microfiber resonator features in low insertion loss, high finesse, easy fabrication, and compatibility with fiber systems. It can be utilized in domains of filter, sensor, modulator, and fiber laser. In this article, we summarize the recent progress in the microfiber resonators research fields, covering fundamental characteristics, fabrication methods, and applications of microfiber resonators.

Keywords: microfiber; resonator; optical fiber sensing; optical modulation

收稿日期: 2022-02-25; 收到修改稿日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62135007)

*通信作者: 徐飞, feixu@nju.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

1 引言

1966年,高锟从理论上首次提出石英光学纤维可以作为光传输介质,并分析了其损耗成因及降低损耗的实验方案^[1]。自此之后,光纤及其相关器件便得到迅猛发展,广泛应用于通讯、传感及医疗等诸多领域^[2-4]。一般常见的通信用单模光纤,其外包层直径为125 μm,纤芯直径约为10 μm,在通讯波段下,光场几乎全部束缚在芯层,故而传输损耗极低(~0.02 dB/km),但因此也限制了其在非线性及传感领域的进一步应用。针对这些特殊的需求,一种拓展光纤在光学非线性与传感领域应用的方案应运而生,即减小光纤直径,缩小有效模场面积的同时增加其泄露的光场,以此来增加光纤非线性,同时增强与外部环境的相互作用。通过将标准单模光纤熔融拉细,使其直径缩小至微米甚至百纳米级别,达到与光波长可比拟的大小,此时的光纤将不再对光场具有强束缚作用,我们将这种光场泄露至周围环境(倏逝场)、直径极细的光纤称为“微光纤”。2003年,Tong和Mazur实际演示了具有可操作性的低损耗微光纤^[5],其直径可达50 nm,且均一性良好,可单模工作,光传播损耗小于0.1 dB/mm。该工作奠定了亚波长光纤研究的基础。从2004年起,Birks、Brambilla、Leon-Saval以及Sumetsky等研究人员通过使用普通单模光纤的拉锥或其他方式,将比拟光波长尺寸的微光纤的损耗持续降低^[6-9]。在过去的十几年里,微光纤因为相对于标准单模光纤具有很多独特的性质,如更强的光场束缚能力、较大的倏逝场、高光学非线性和较柔韧的机械强度^[9-11],受到研究者的青睐。

光学谐振器是一种基础的光子学结构,基于此结构的器件被广泛应用于通信、传感、量子物理研究等领域。而小尺度的微谐振器能够将光限制在一个极小的体积内,实现更广的自由光谱范围和更灵活的调控与探测能力,在高速光通信、微波光子学、光频梳产生、光谱学等领域均有突出表现^[12-14]。近十多年来,各种不同的回音壁式(whispering gallery mode, WGM)

微腔不断涌现,包括片上微环谐振腔、柱形腔、盘形腔、球形腔以及光子晶体缺陷腔等^[15-17]。这些结构大多基于微纳加工技术,制备工艺条件相对复杂。同时为了激发理想的模式,并与光纤光学系统兼容,这些谐振器对耦合状态的要求也极为苛刻。因此,伴随着微光纤损耗的持续降低,具有全光纤特点的基于微光纤的微谐振器概念被提出并逐步发展。

来自德国的学者最早在1989年将光纤拉锥至8 μm,再将微光纤叠成环状,封装到聚合物中,形成了已知的第一个微光纤光学谐振腔^[18]。但由于此时微光纤控制技术并未成熟,损耗极大,因此它的实用价值并未引起关注。2003年Tong等研究者在展示低损耗微光纤的同时也演示了这一微光纤形成结形微环结构的可行性^[5],正式拉开了微光纤谐振器发展的序幕。此后,基于微光纤的结形^[19]、环形^[20]、线圈形^[21]等各种形状的微谐振器纷纷被实验展示,而相应的基于耦合波理论的模型也趋于完善^[22-24]。在此基础上,微光纤谐振器在近十年开始被广泛应用于滤波器、传感器、光调制器和光纤激光等诸多领域,大大拓展了微光纤功能与应用广阔可能性,为各类场景提供了全光纤、易制备的光学微谐振器解决方案。本文将从微光纤光学谐振器的基本原理、器件制备、应用领域几个方面展开介绍。

2 微光纤谐振器的基本原理

2.1 微光纤的波导特性

由工业生产的标准光纤拉制的微光纤(microfiber),其结构一般由三部分组成:腰区、过渡区和尾纤部分,如图1所示。腰区的直径($2r_w$)可以达到几微米乃至几百纳米,长度(l_w)一般在几到几十毫米不等。通常而言,过渡区的直径($r(z)$)缓慢变化,呈现锥形分布,其长度(z_0)也远比腰区长,不过也可以通过改变制备方式获得较短的突变过渡区。尾纤的直径($2r_0$)则与拉制前的普通光纤包层直径一致。

普通阶跃型光纤一般具有三层波导结构,其横截

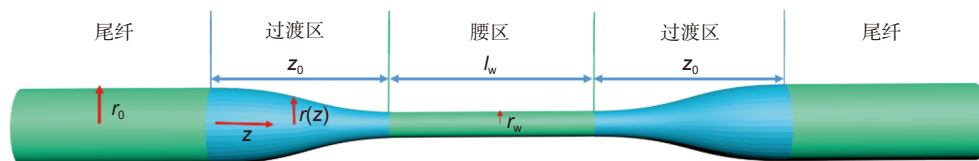


图1 微光纤结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a microfiber

面示意图如图 2 所示, 由内到外分别是折射率为 n_1 半径为 r_1 的芯层, 折射率为 n_2 半径为 r_2 的包层以及折射率为 n_3 的环境介质, 一般为了使光场主要束缚在芯层中, 三层介质的折射率关系为 $n_1 > n_2 > n_3$ 。

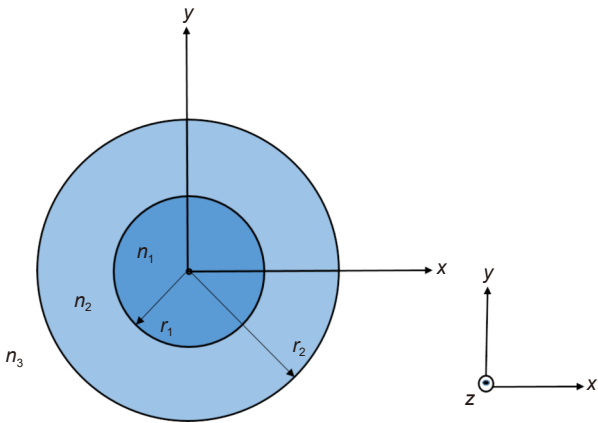


图 2 阶跃光纤截面示意图
Fig. 2 Cross-section of step-index fiber

光纤中的电磁场分布符合麦克斯韦方程组。基于以上模型, 可以推导相应亥姆霍兹方程, 进而导出不同模式在柱坐标系 (z, r, θ) 下的本征方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + [k^2 n^2(r, \theta) - \beta^2] E_z = 0 \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + [k^2 n^2(r, \theta) - \beta^2] H_z = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $n(r, \theta)$ 代表介质中的折射率, k 为真空中的波数, ω 为角频率, k 与 ω 关系如下:

$$k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: c 为真空中的光速, λ 为光波长。利用边界条件数值计算得传播常数 β , 之后即可求解微光纤中的光场分布, 即微光纤的模式。图 3(a) 展示了光纤中的 HE_{11} 和 HE_{12} 模式有效折射率变化情况随光纤直径大小的关系, 可以看到, 当光纤包层直径低于 $45.75 \mu\text{m}$ 时, 光纤中芯层模式消失, 包层模式占主导;

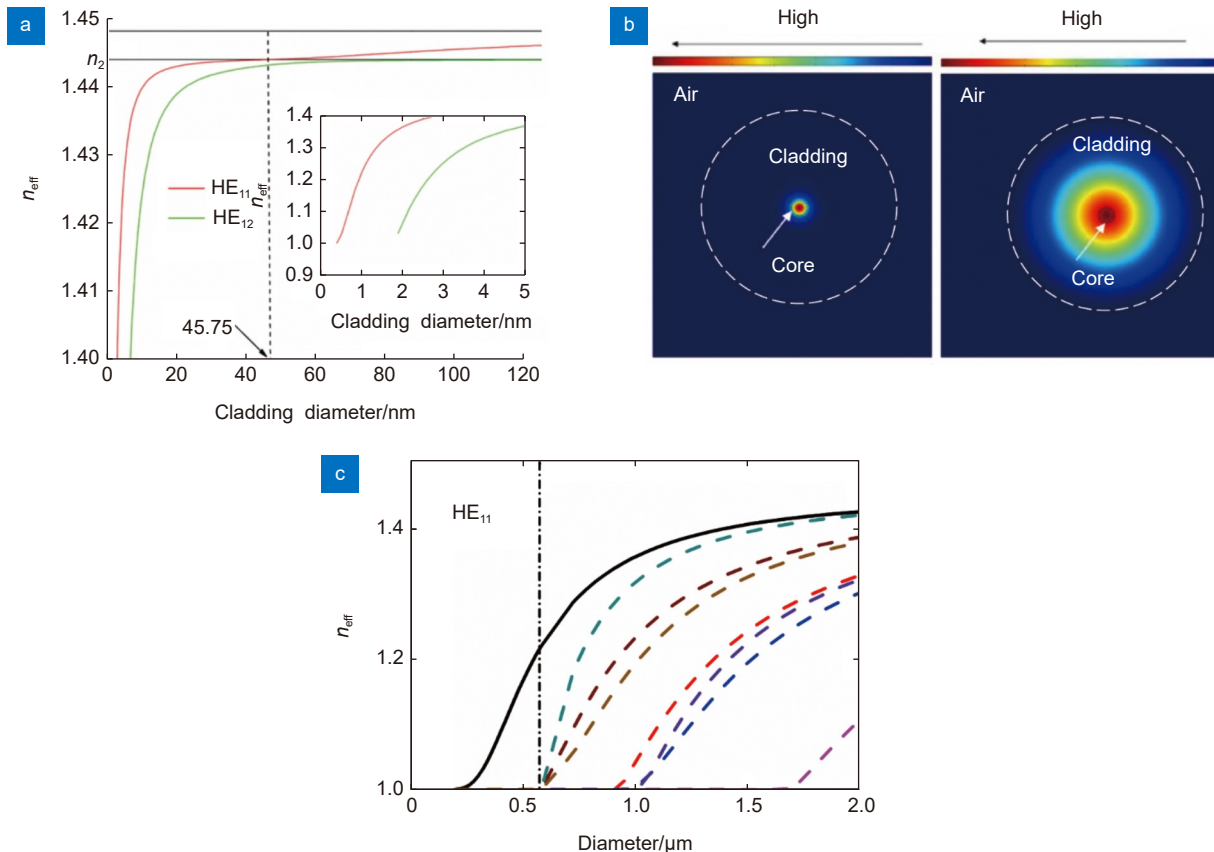


图 3 (a) 不同直径的阶跃型光纤 HE_{11} 和 HE_{12} 模的有效折射率; (b) 包层直径分别为 $80 \mu\text{m}$ 及 $20 \mu\text{m}$ 时的模场分布^[25]; (c) 800 nm 波长下微光纤不同高阶模有效折射率随直径的变化

Fig. 3 (a) Effective refractive index of HE_{11} and HE_{12} mode for step-index fiber with varied diameter; (b) Cross-section mode field distribution of fiber with cladding diameter of $80 \mu\text{m}$ and $20 \mu\text{m}$ ^[25]; (c) Variation of effective refractive index for high-order modes in microfiber versus diameter at wavelength of 800 nm

图 3(b) 展示了包层直径为 80 μm 和 20 μm 时, HE₁₁ 模式的截面光场分布, 同样表明包层模扩张主导的情况^[25]。

而对于微光纤来说, 其直径在数微米乃至数百纳米量级, 芯层相对包层可以被忽略, 光纤三层结构可以简化为微光纤双层结构, 即 $r_1 \ll \lambda$ 、 $r_2 \sim \lambda$ 时:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & (0 < r < r_1) \\ n_2 & (r_1 \leq r < \infty) \end{cases} \quad (3)$$

通常情况下, 我们使用的微光纤在空气环境中, 可以认为 $n_2=1$, 对于混合模 EH_{vm} 和 HE_{vm}, 有如下的关系^[26]:

$$\left\{ \frac{J'_\nu(U)}{UJ_\nu(U)} + \frac{n_2^2 K'_\nu(W)}{n_1^2 WK_\nu(W)} \right\} \cdot \left\{ \frac{J'_\nu(U)}{UJ_\nu(U)} + \frac{K'_\nu(W)}{WK_\nu(W)} \right\} = \left(\frac{V}{UW} \right)^4 \cdot \left(\frac{\nu\beta}{kn_1} \right)^2 \quad (4)$$

而光纤中的 TM_{0m} 模式, 有如下的关系:

$$\frac{n_2^2 K_1(W)}{n_1^2 WK_0(W)} + \frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = 0 \quad (5)$$

对于光纤中的 TE_{0m} 模式, 有如下的关系:

$$\frac{K_1(W)}{WK_0(W)} + \frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} = 0 \quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned} U &= r_1 k (n_1^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2}, \\ V &= r_1 k (n_1 - n_2)^{1/2}, \\ W &= r_1 k (n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)^{1/2}. \end{aligned} \quad (7)$$

J_ν 为第 1 类 ν 阶贝塞尔函数, K_ν 为第 2 类 ν 阶贝塞尔函数。通过数值求解不同阶数的方程 (4), 可以获得不同的导模, 即微光纤的横模。同时可以得到不同横模有效折射率随 V 变化的色散曲线, 而由式 (7) 可知 V 与微光纤半径 r_1 成正比。如图 3(c) 就展示了在 800 nm 波长下计算得到的不同横模有效折射率随直径变化的曲线。可以看到, 除了基模 HE₁₁ 外, 在合适的尺寸下微光纤是可以支持高阶模传播的, 且直径越大, 支持的模式越多, 模式数量可参考阶跃光纤模型的模式数估算公式 $N \approx V^2/2$ 。而当微光纤直径小于临界值, 即使得 $V < 2.405$ 时, 可实现单模传输。

微光纤材料一般为二氧化硅, 其折射率 n_1 与入射波长有关, 可以使用 Sellmeier 多项式进行拟合^[27]:

$$n_1(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{c_1 \lambda^2}{(\lambda^2 - c_4)} + \frac{c_2 \lambda^2}{(\lambda^2 - c_5)} + \frac{c_3 \lambda^2}{(\lambda^2 - c_6)}}, \quad (8)$$

这里波长 λ 单位为 μm, $c_1 = 0.6965325$, $c_2 = 0.4083099$,

$c_3 = 0.8968766$, $c_4 = 4.368309 \times 10^{-3}$, $c_5 = 1.394999 \times 10^{-2}$, 以及 $c_6 = 9.793399 \times 10$ (c_4, c_5, c_6 量纲为 μm²)。微光纤相应模式的群速色散可通过对数值求解式 (4)~式 (6) 得到的有效折射率 n_{eff} 对波长求导获得, 一般表达式为

$$D_f = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{\text{eff}}}{d\lambda^2} \quad (9)$$

2.2 微光纤谐振器

2.2.1 微光纤谐振器的几何构型

通常而言, 根据器件的结构特征, 基于微光纤的谐振器可分为三种类型, 即环形、结形与线圈形。

环形谐振器 (Microfiber loop resonator, MLR) 是通过将微光纤腰区扭转成环形结构, 利用静电力或范德华力在接触点附近的区域形成耦合, 入射光通过接触点附近时, 一部分光传输进入环中, 实现了光场在微环中的聚集, 而另一部分则通过倏逝场耦合的形式传输到接触点另一侧的光纤中输出, 如图 4(a) 所示。

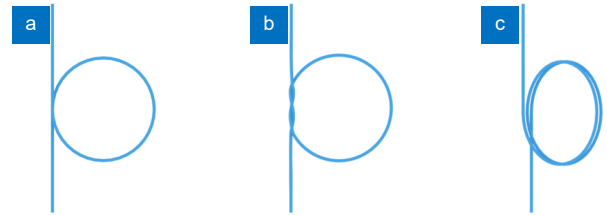


图 4 微光纤谐振器。

(a) 环形谐振器; (b) 结形谐振器; (c) 线圈形谐振器
Fig. 4 Microfiber resonators. (a) Microfiber loop resonator; (b) Microfiber knot resonator; (c) Microfiber coil resonator

结形谐振器 (Microfiber knot resonator, MKR) 是通过将微光纤打结绕环的方式形成结形结构, 光学耦合的基本原理与环形谐振器类似, 相较于环形谐振器, 结形谐振器接触区域通过机械应力结合, 因而更为牢固稳定, 如图 4(b) 所示。

线圈形谐振器 (Microfiber coil resonator, MCR) 则是通过将微光纤绕在一根支撑棒上, 当每一圈之间的距离较近时, 微光纤之间则由于倏逝场发生耦合, 通过调节绕在棒上的光纤圈数以及每一圈之间的距离可以调节耦合效率, 如图 4(c) 所示。

2.2.2 微光纤谐振器的耦合波理论

由于不同种类微光纤谐振器都是基于微光纤波导间的耦合, 因此我们只需从较为复杂的线圈形谐振器出发进行讨论, 而微光纤环形以及结形谐振器则可以视为圈数为 1 的线圈代入结论即可。基于耦合波理

论的MCR模型中, 原则上任意两环之间均会发生耦合, 但通常会简化成只与邻近两环耦合, 按照 Sumetsky 提出的矩阵进行计算^[22]。

当入射光沿微光纤环路传输时, 由于微光纤存在较大倏逝场, 当两个线圈之间距离缩小到一定程度时, 各微光纤线圈之间将会发生相互耦合作用。如图 5(a) 所示, 在分析微光纤线圈型模型时采取直角自然坐标系 (x, y, s) , 分别定义水平法向 \mathbf{n} , 竖直法向 \mathbf{b} 以及沿光纤传输的方向 \mathbf{s} , 则传输的电场可以由下式表示^[24]:

$$E(x, y, s) = F_0(x, y)A(s) \exp\left\{i \int_0^s \beta(s) ds\right\} \exp(i\omega t), \quad (10)$$

$$\frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \\ \dots \\ A_{M-1} \\ A_M \end{bmatrix} = i \begin{bmatrix} 0 & R_1(\theta)\chi_{12}(\theta) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_2(\theta)\chi_{21}(\theta) & 0 & R_2(\theta)\chi_{23}(\theta) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_3(\theta)\chi_{32}(\theta) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & R_{M-2}(\theta)\chi_{(M-2)(M-1)}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R_{M-1}(\theta)\chi_{(M-1)(M-2)}(\theta) & 0 & R_{M-1}(\theta)\chi_{(M-1)M}(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & R_M(\theta)\chi_{M(M-1)}(\theta) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \\ \dots \\ A_{M-1} \\ A_M \end{bmatrix} \quad (12)$$

在上述耦合矩阵中 χ_{pq} 有如下关系:

$$\kappa_{pq}(\theta) = \chi_{pq}(\theta) \exp\left\{-i \int_0^{2\pi} \beta_p(\theta) r d\theta + i \int_0^{2\pi} \beta_q(\theta) r d\theta\right\}, \quad (13)$$

而 $\kappa_{pq}(\theta)$ 代表了微光纤线圈型谐振器中第 p 圈和第 q 圈之间的互耦合 ($p, q=1, 2, 3, \dots, M$), 表达

其中: $F_0(x, y)$ 为矢量函数, $A(s)$ 为振幅。将第 m 圈的振幅定义为 $A_m(s)$, s 满足条件 $0 < s < S_m$, 其中第 m 圈的长度为 S_m , 进一步假定微光纤线圈型谐振器中每一圈都是半径为 R_m 的微光纤圆环, 那么 s 则表示为 $R_m\theta$, 其中 $0 \leq \theta \leq 2\pi$, 如图 5(b) 所示。可以将第 m 圈光纤中的电场分布写成以下形式:

$$E_m(x, y, \theta) = F_0(x, y)A_m(\theta) \exp(\beta R\theta). \quad (11)$$

首先我们考虑两圈微光纤之间的关系, 如图 5(c) 所示是线圈中相邻的第 p 圈和第 q 圈的截面示意图, 光纤折射率 n_f , 环境折射率 n_c 。对于 M 圈的情况, 用耦合模方程描述:

形式为

$$\kappa_{pq} = \frac{\omega \epsilon_0 \iint_{O_p} (n_f^2 - n_c^2) E_p^* E_q dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_z (E_p^* H_q + H_p^* E_q) dx dy}, \quad (14)$$

其中: $E_p(E_q)$ 以及 $H_p(H_q)$ 是 p (q) 中的电磁场。上述式中, 系数 $A_m(\theta)$ 和 $R_m(\theta)$ 需要满足如下的连续性条件:

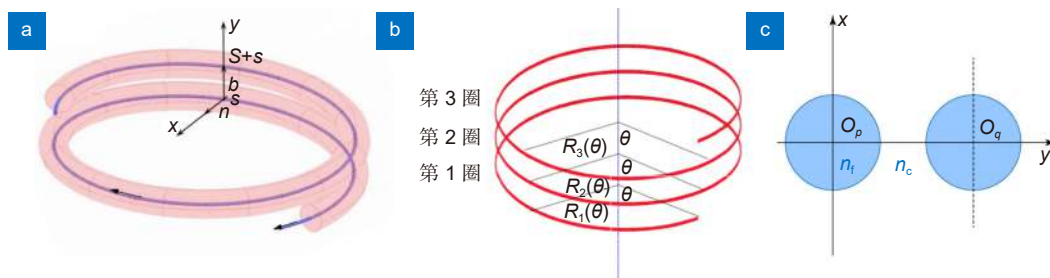


图 5 (a) 微光纤线圈的自然坐标系; (b) 柱坐标下的微光纤线圈; (c) 两个相邻线圈的截面
Fig. 5 (a) Natural coordinate system of MCR; (b) MCR under cylindrical coordinates; (c) Cross-section of adjacent microfibers

$$\begin{cases} R_{m+1}(0) = R_m(2\pi) \\ A_{m+1}(0) = A_m(2\pi) \exp\left\{i \int_0^{2\pi} \beta(\theta) R_m d\theta\right\} \end{cases}, \quad (15)$$

其中: $m = 1, 2, \dots, M-1$ 。设微光纤的腰区直径和相邻圈与圈之间的间距恒定, 系数 β 、 κ_{pq} 以及 R 均与 θ 无关, 定义耦合系数 K :

$$K = 2\pi R_0 \kappa, \quad (16)$$

其中: R_0 为平均半径、 κ 为简化为常量的互耦合。同时引入变换:

$$B_m(\theta) = A_m(\theta) \exp(i\beta R_m \theta), \quad (17)$$

其中: $m = 1, 2, \dots, M-1$ 。此时连续性条件转化为

$$B_{m+1}(0) = B_m(2\pi), \quad (18)$$

其中: $m = 1, 2, \dots, M-1$ 。定义振幅透射率 $T = B_M(2\pi)/B_1(0)$, 假定 M 圈的光纤是均匀且其分布也是均匀的, 即 $R_m = R_0$, 则可以得到:

$$T = \frac{1}{A_1(0)} \times \sum_{n=1}^M b_{n1} B_{nM}(2\pi). \quad (19)$$

对于 $M = 1$ 的环形或者结型谐振器与 $M = 2$ 的线圈形谐振器而言, 在无外部损耗的情况下, 其振幅透射率为:

$$T = \frac{e^{i\beta 2\pi R_0} - i \sin(K)}{e^{-i\beta 2\pi R_0} + i \sin(K)}, \quad (20)$$

谐振条件为

$$\begin{aligned} K &= K_u = \frac{(2u-1)\pi}{2}, \\ \beta 2\pi R_0 &= 2v\pi + \frac{\pi}{2}, \end{aligned} \quad (21)$$

其中: u, v 为整数。对于 $M = 3$ 的线圈形谐振器则有:

$$T = \frac{e^{-i\beta 2\pi R_0} - \sqrt{2}i \sin(\sqrt{2}K) - e^{i\beta 2\pi R_0} \sin^2(\sqrt{2}K)}{e^{i\beta 2\pi R_0} + \sqrt{2}i \sin(\sqrt{2}K) - e^{-i\beta 2\pi R_0} \sin^2(\sqrt{2}K)}, \quad (22)$$

谐振条件为

$$\begin{aligned} K &= K_u^{(1)} = \frac{(2u-1)\pi}{\sqrt{2}}, \\ \beta 2\pi R_0 &= v\pi, \end{aligned} \quad (23)$$

或

$$\begin{aligned} K &= K_{uc}^{(2)} = \sqrt{2} \left[\varepsilon \arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) + u\pi \right] \\ \beta 2\pi R_0 &= \left(2v + \frac{\varepsilon}{2}\right)\pi, \varepsilon = \pm 1. \end{aligned} \quad (24)$$

通常情况下, 在应用过程可将多环的情况近似简化为单环来快速估算其谐振特性。

2.2.3 微光纤谐振器的主要参数

谐振器作为一种全通滤波器, 其传输谐振与群延迟 t_d 相关。群延迟表示一个窄带脉冲在器件中所经历的时间延迟, 定义为总相移相对角频率的变化率。对于一个无损耗谐振器, t_d 与透过率 T 以及传播常数 β 相关:

$$t_d = \frac{n_r}{c} \frac{d \ln T}{d\beta}, \quad (25)$$

其中: n_r 为谐振器的折射率。图 6(a) 展示两圈 MCR 在不同的耦合参数下的群延迟谱。

色散是微光纤谐振器需要考虑的重要参数。微光纤谐振器的色散包括了波导色散和耦合色散。其中波导色散主要由微光纤的色散决定, 而耦合色散主要由于相邻线圈之间的高耦合强度与较长的耦合长度导致, 这里我们以两圈的 MCR 为例进行讨论。考虑光在具有损耗的两圈 MCR 中传播, 则式 (20) 可改写为

$$\begin{aligned} T &= \frac{\cos \beta L + i(\sin \beta L - \gamma^{-1} \sin K)}{\cos \beta L + i(-\sin \beta L + \gamma \sin K)}, \\ \gamma &= \exp(-\alpha L), \end{aligned} \quad (26)$$

其中: L 是谐振器一圈的长度, $\beta = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为传播常数, n_{eff} 为有效折射率, α 为损耗系数, K 为相邻两圈之间的耦合参数。代入式 (25) 求得群延迟在谐振频率处微分可得色散表达式:

$$\begin{aligned} D_R &= -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega_0} \\ &= \frac{D_f L(2 - \xi\mu)}{1 + \mu^2 - \xi\mu} \\ &\quad - \frac{\frac{d\beta}{d\omega} \Big|_{\beta_0} L \frac{d\mu}{d\lambda} [2(2 - \xi\mu)(2\mu - \xi) - i\zeta^2\mu]}{(1 + \mu^2 - \xi\mu)^2}, \end{aligned} \quad (27)$$

其中: $\xi = \gamma^{-1} + \gamma$, $\zeta = \gamma^{-1} - \gamma$, $\mu = \sin K$, D_f 为微光纤的群色散, 由式 (9) 求解。这两项分别对应了前述的波导色散与耦合色散。图 6(b) 展示了在接近谐振点的情况下 ($K = 1.1\pi/2$) 器件总色散 D_R 随微光纤直径 d 和相邻线圈距离 l 与 d 的比值 l/d 的分布, 可见色散最大可达 2×10^4 ps/(nm·mm), 也可低至 0。

对式 (26) 求平方, 可得微光纤谐振器强度透射率表达式^[27]:

$$\begin{aligned} |T|^2 &= (1 - \gamma) \\ &\quad \cdot \left\{ 1 - \frac{[1 - A] \sin^2(\kappa l)}{[1 - B \cos(\kappa l)]^2 + 4B \cos(\kappa l) \sin^2(\beta L/2)} \right\}, \end{aligned} \quad (28)$$

其中: $A = (1 - \gamma) \exp(-\rho L)$, $B = (1 - \gamma)^{1/2} \exp\left(-\frac{\rho}{2} L\right)$, κ ,

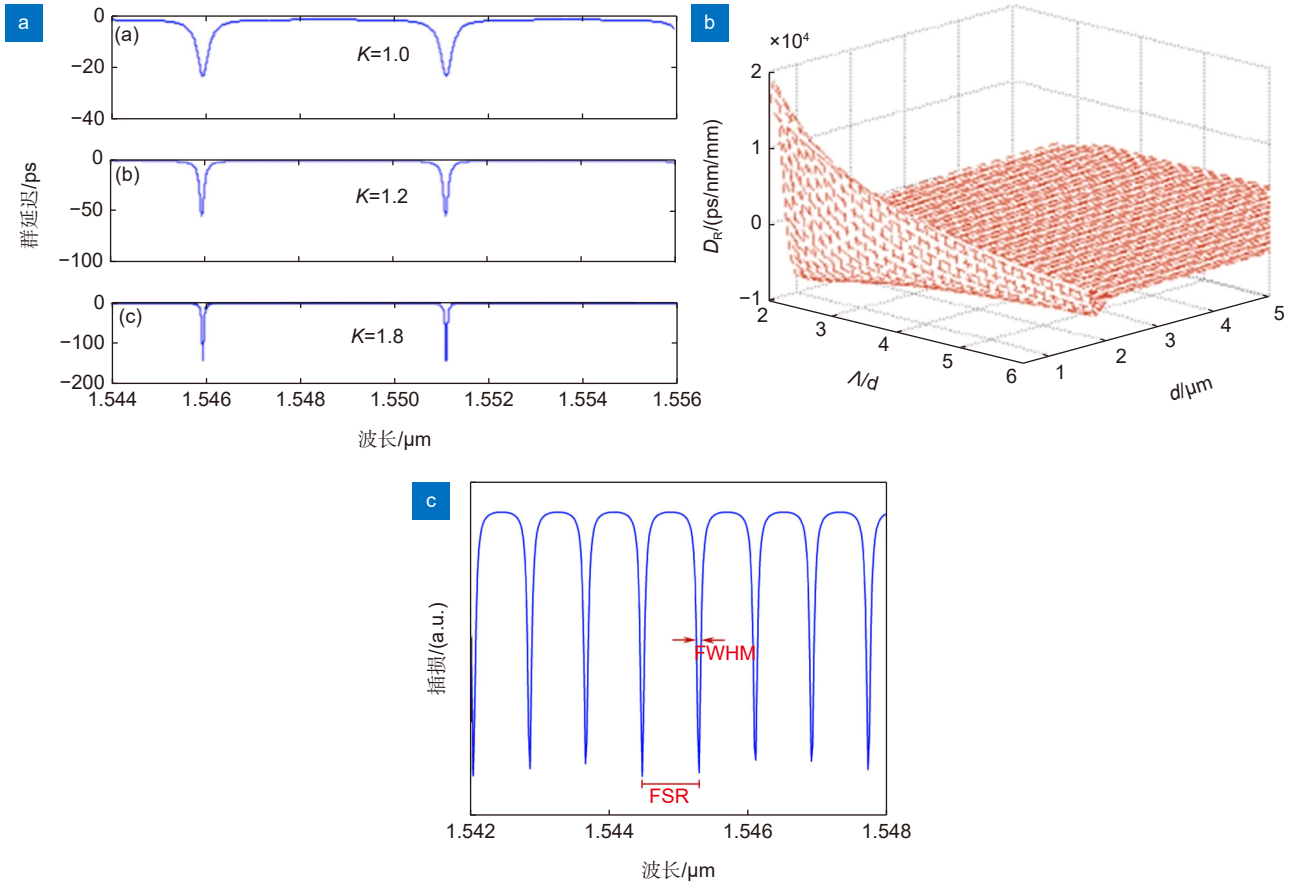


图 6 微光纤谐振器的特征参数。(a) 群延迟谱; (b) 色散; (c) 透射谱
 Fig. 6 Parameters of microfiber resonator. (a) Group delay; (b) Dispersion; (c) Transmission spectrum

l, γ 以及 ρ 分别表示模式耦合效率, 耦合长度, 器件插入损耗以及强度损耗系数。图 6(c) 展示了根据上式绘出的典型的微光纤谐振器的透射谱。据此我们可以分析多个谐振器的重要参数, 包括: 自由光谱范围 (free spectra range, FSR)、精细度 (finesse, f) 以及品质因子 (Q 值)。

如图 6(c) 所示, 自由光谱范围表示为两个相邻谐振峰之间的间隔, 严格意义上应该等于光在介质中传输周期的倒数, 当用波长形式来表示时, 根据谐振条件有:

$$FSR \approx \Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{n_{\text{eff}}L}, \quad (29)$$

其中: n_{eff} 是指谐振器中的有效折射率, λ 是光波长, L 是谐振器腔长。自由光谱范围在传感中往往限定了测量的量程, 在滤波应用中则决定了波长的调节范围。

精细度 (finesse, f) 是一个由半高全宽 (full-width half maximum, FWHM) 以及自由光谱范围 FSR 衍生出的参数, 其定义如下:

$$f = \frac{FSR}{FWHM}, \quad (30)$$

品质因子 Q 为光波长 λ 与 FWHM 的比值^[28]:

$$Q = \frac{\lambda}{FWHM}, \quad (31)$$

根据这一定义, 结合前述推导可以得到

$$\frac{1}{Q} \propto \alpha + (K - K_m)^2, \quad (32)$$

其中: α 为损耗, K 为耦合参数, K_m 为谐振时的耦合参数。 Q 值描述了谐振器对进入其内部的光的束缚本领, 从上式可以看出这一数值主要由谐振腔的耦合与损耗决定, 损耗越低, 耦合越接近谐振态, 则 Q 值越高, 谐振器束缚光的能力就越好, 光子寿命就越长。微光纤谐振器的 Q 值通常在 $10^3 \sim 10^5$ 范围, 而只考虑石英材料的本征损耗的话, 基于微光纤的谐振器的 Q 值极限超过 10^9 ^[10]。

图 7 展示近十多年来基于微光纤谐振器一些典型工作的器件 Q 值发展路线^[5,8,20-21,29-40], 可以看出总体趋势是进步的, 无论是 MLR, MCR 还是 MKR 都可

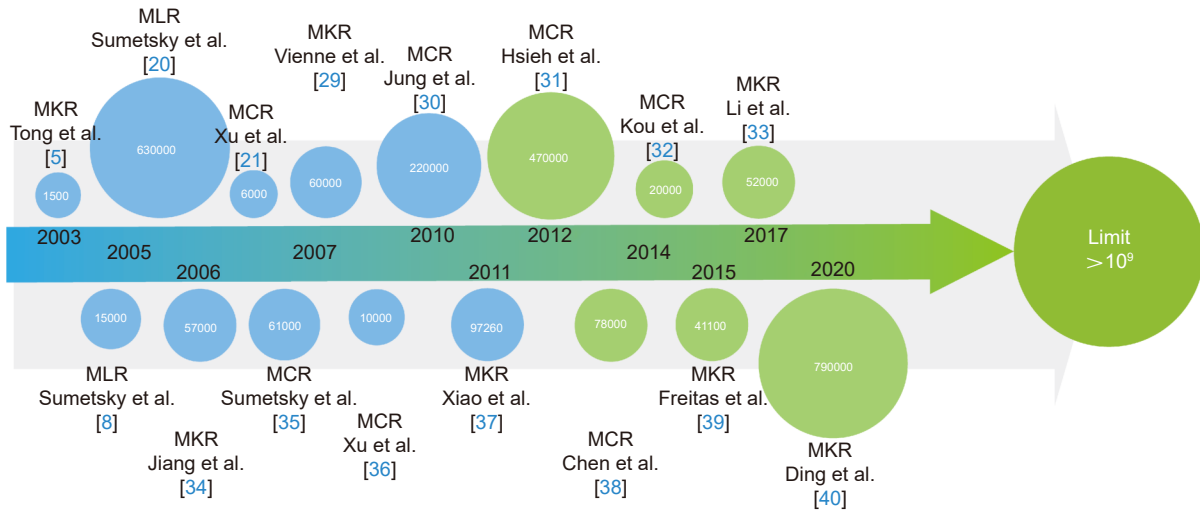


图 7 微光纤谐振器的 Q 值
Fig. 7 Roadmap of evolution in Q-factor of microfiber resonator

以达到 10^5 量级的高耦合、低损耗理想状态,但在达到理论极限之前还有很大挖掘的空间,这将伴随着工艺的摸索,因此提升微光纤谐振器 Q 值的道路机遇与挑战并存。

2.2.4 微光纤谐振器的传感特性

由于微光纤的倏逝场直接与外部环境接触,环境的特征参量变动一般会带来波导有效折射率的变化,进而导致谐振模式的漂移,这便是将微光纤谐振器应用于温度、折射率和应力等传感的基本原理。传感灵敏度往往取决于微光纤的尺寸。由于微光纤谐振器的 Q 值较高,因此灵敏度通常会优于类似原理的光纤器件(如光纤光栅),传感分辨率也更高。同样以两圈 MCR 为例,根据谐振条件有

$$\lambda_{res} = \frac{4L(T, \epsilon)}{2m + 1} n_{eff}(r_{MF}, n_f, n_a, T, \epsilon), \quad (33)$$

式中: λ_{res} 为谐振波长, m 为整数,有效折射率 n_{eff} 表示为微光纤半径 r_{MF} , 微光纤折射率 n_f , 环境折射率 n_a , 温度 T 与应力 ϵ 的函数, L 为一圈的腔长。当微光纤谐振器作为折射率传感器时,其灵敏度定义为

$$S_a = \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial n_a} = \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_a} = \frac{\lambda_{res}}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_a}. \quad (34)$$

作为温度传感器时,由于热光效应和热膨胀同时存在,微光纤谐振器的谐振模式将受三方面因素同时影响:折射率变化、微光纤直径变化和谐振器直径变化。其温度灵敏度表达为

$$S_T = \frac{\partial \lambda_{res}}{\partial T} = \frac{4L}{2m + 1} \left(\sigma_T \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_f} + r_{MF} \alpha_T \frac{\partial n_{eff}}{\partial r} + n_{eff} \alpha_T \right). \quad (35)$$

此处二氧化硅的热光系数 $\sigma_T = 1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 热膨胀系数 $\alpha_T = 5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。由于热膨胀的贡献一般小于 $2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 而占据主导的热光效应的贡献达到 $\sim 10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ $- 20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 因此热膨胀项一般可以忽略。当作为应力传感器时,在微光纤谐振器中起主要作用的则是弹光效应,而应力导致的微光纤与谐振器尺寸变化同样可以忽略。记施加的相对应力为 ϵ , 微光纤的有效弹光系数为 p_{eff} , 则应力灵敏度可写为

$$S_s = \frac{\Delta \lambda_{res}}{\epsilon} = \lambda_{res} (1 - p_{eff}). \quad (36)$$

3 微光纤谐振器的制备

3.1 微光纤的制备

在实际应用中,为了获得表面光滑、损耗极低以及截面对称的微光纤,研究者们探索了“腐蚀法”和“热拉伸法”。腐蚀法使用 HF 缓冲溶液刻蚀光纤包层以获得倏逝场,通常难以得到光滑表面而造成巨大散射损耗。热拉伸法简便安全、可重复性高、更容易控制,又可分为“两步法”、“体块直接拉制法”和“扫火法”。“两步法”由 Tong 等人于 2003 年提出,首先通过传统热熔融拉伸获得粗制光纤探针,再将其绕在蓝宝石尖端上,加热利用蓝宝石热学特性匀速垂直拉制可获得微光纤。在此基础上,2006 年“体块直接拉制法”又被提出。通过加热的蓝宝石纤维接触石英块蘸取部分熔融石英,再用另一根蓝宝石纤维接触这一附着的熔融部分,然后让两根蓝宝石纤维均匀分离即可得到微光纤。“扫火法”则是热拉伸工艺定量

化、自动化的成熟发展产物, 将微光纤损耗进一步降低一个数量级。表 1 展示了三类热拉伸工艺的性能参数对比, 其中低损耗直径指能达到所列举损耗水平的最小直径, 极限直径为该工艺能够制备的最小直径。

扫火法基于火焰加热光纤致使其软化, 两个移动方向相反的步进电机拉扯光纤使中间加热部分变细从而得到微光纤, 其系统装置如图 8(a) 所示。微光纤的腰区长度通过火焰沿光纤的扫描范围决定, 微光纤的直径可以通过火焰温度以及两侧电机的牵引应力决定。在早期的实验中, 这类方法通常损耗较高, 且光纤只能到微米级别, 但之后 Brambilla 等对此方法进行改进, 并成功拉制出直径到达百纳米级别, 损耗较低的微光纤。他们使用高纯度的燃烧气体, 使得燃烧系统较稳定, 避免了外部环境的干扰, 微光纤样品的良品率得到较大提升^[42-44]。此外, 也有此种类型控制方法的其他形式, 比如使用 CO₂ 激光器加热蓝宝石套管, 使光纤在蓝宝石套管中受热软化, 再控制电机拉伸得到微光纤^[8]。也可以通过将加热区域改装为陶瓷管, 通过电阻加热的方法来拉制微光纤, 这两种方法都通过非接触热拉伸方法拉制微光纤, 从而避免了火焰直接加热拉制方法中残留大量 OH 的问题。图 8(b) 为拉制所成的微光纤的扫描式电子显微镜 (SEM) 照片, 该微光纤直径约为 270 nm。

3.2 微光纤谐振器的制备

3.2.1 微光纤环形与结形谐振器的制备

一般来说微光纤环形谐振器制备相对简单。在微光纤拉制完成后将其腰区弯折交叠, 使其在应力作用下形成环状, 而交叠部分由于静电力作用形成一定长度的耦合区, 即构成了环形谐振腔^[8,20,45], 如图 9(a) 所示。

而结形谐振器制备相对复杂。早期报道的大部分微光纤结形谐振器是采用打断微光纤, 再用锥形光纤探针在显微镜下通过微操作完成^[34,46]。此种微加工的方法, 能够对光纤进行各类操作, 便于制作出满足需要的微光纤结形谐振器, 能够很精确地控制谐振器的直径, 调节谐振器打结位置, 因此广泛应用于各类折射率传感, 温度传感等。如图 9(b) 所示, 此类打结方法需要首先将光纤打断, 然后对打断的光纤腰区进行操作, 成环结后再通过尾纤将光耦合出来, 因此缺陷也比较明显, 一是打断光纤再耦合使得损耗较大, 无法满足损耗要求严格的系统中的应用, 二是打断再耦合的过程造成整体结构的稳定性降低, 在一些动态传感应用中容易引入较大噪声。

为此研究者们提出了不剪断微光纤, 直接打结成环制作成双锥结构的微光纤结形谐振器的方案^[33,37]。如图 9(c) 所示, 首先从步进电机位移台上取下拉制好

表 1 三种热拉伸制备微纳光纤工艺性能对比

Table 1 Performance comparison of 3 microfiber fabrication methods

	两步法	体块直接拉制法	扫火法
玻璃材料	石英	石英、碲酸盐、磷酸盐	石英
损耗/(dB/mm)	0.1 (633/1550 nm)	~ 0.1 (633 nm)	~ 0.02 (1550 nm)
低损耗直径/nm	450/1100 (633/1550 nm)	420/280/410 (石英/碲酸盐/磷酸盐)	375
极限直径/nm	50	50	130
参考文献	[5]	[41]	[9, 42]

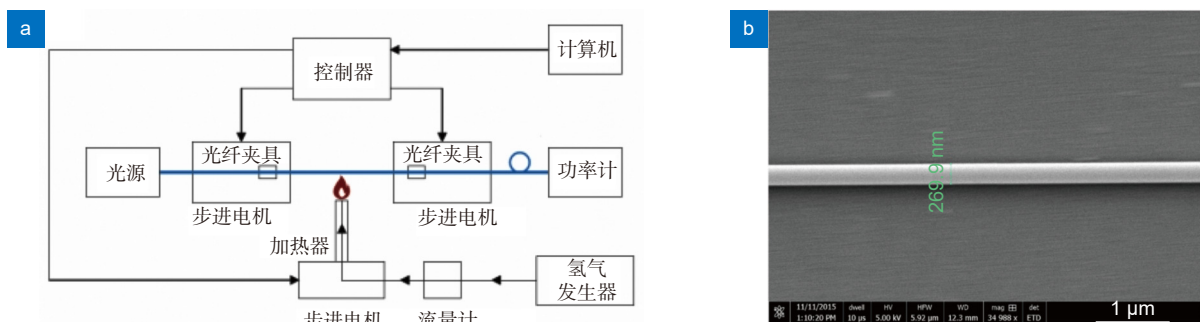


图 8 (a) “扫火法”系统示意图; (b) 石英材料微光纤的扫描电镜照片

Fig. 8 (a) Schematic diagram of flame-brushing technique; (b) SEM image of a silica microfiber

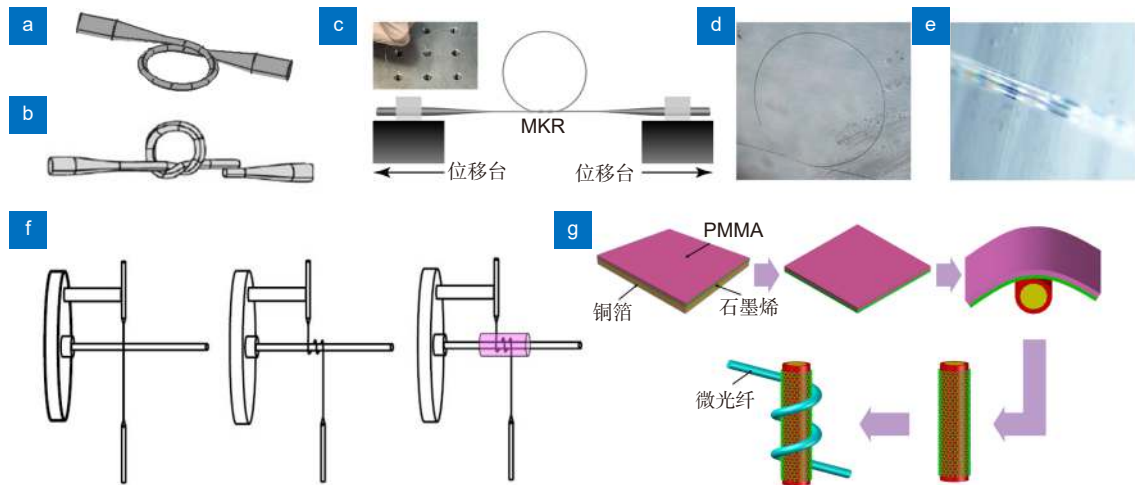


图9 微光纤谐振器的制备。(a) MLR的制备; (b) MKR 打断式制备; (c) MKR 完整式制备; (d) MKR 样品实物显微照片; (e) 三圈 MCR 样品实物显微照片; (f) MCR 的制备; (g) 石墨烯集成 MCR 的制备

Fig. 9 Fabrication of microfiber resonator. (a) Fabrication of MLR; (b) MKR's cutting-end fabrication; (c) MKR's complete fabrication; (d) Microscopic image of MKR; (e) Microscopic image of MCR; (f) Fabrication of MCR; (g) Fabrication of graphene-integrated MCR

的微光纤, 基于微光纤较好的机械强度, 可以直接徒手提起微光纤而不至于断裂; 然后通过手工协调配合打结成一个大环, 握住结形区逐渐将环缩小; 当环结区域接近微光纤区域时将整个结构置于拉光纤的步进电机上, 通过计算机控制步进电机, 使得环结逐渐缩小并最终在腰区形成一个结形谐振器。图 9(d) 展示了一个 MKR 的光学显微照片。

3.2.2 微光纤线圈形谐振器的制备

微光纤线圈形谐振器的制备, 需要专用的旋转台工具辅助^[30-31,36,47]。其具体流程如图 9(f) 所示, 第一步, 在旋转台中心固定一根辅助棒, 同时用夹具将微光纤的一侧尾纤固定, 另一侧垂下, 使腰区与辅助棒高度持平。第二步, 转动旋转台, 微光纤会旋绕在辅助棒上, 控制活动端的尾纤可以改变线圈的位置与环间距; 完成后如想监测器件的谐振性能, 可以将两端分别连接宽带光源和光谱仪进行扫描。最后一步, 使用折射率匹配的聚合物进行样品的封装。图 9(e) 展示了一个完成的 3 圈 MCR 样品。一般辅助棒直径尺寸可以从几十微米到几毫米不等。

如果使用的辅助棒具有表面或者内部的功能性结构时, 微光纤的倏逝场还可以使得光在谐振同时与复杂结构作用, 实现多种应用功能。理论上在有限的尺寸内 MCR 环数的增加可以实现光与功能性结构作用距离的最大化。如图 9(g) 就展示了在辅助棒上修饰石墨烯实现石墨烯集成 MCR 器件的制备工艺流程。第一步将铜基 CVD 生长的石墨烯表面滴上 PMMA 苯甲

醚溶液在匀胶机中进行匀胶, 之后加热固化; 第二步将 PMMA 固化后的铜箔进行腐蚀, 完成后将石墨烯-PMMA 转移至超纯水中漂洗; 第三步准备一根折射率匹配的辅助棒, 将浮在超纯水表面的薄膜提起, 使其附着于棒的侧面; 第四步是将棒泡入丙酮中以去除 PMMA, 从而实现石墨烯集成的辅助棒。这之后的工艺流程则与前述 MCR 的制备方法一致, 实现微光纤在辅助棒上的绕环即可。

3.2.3 微光纤谐振器的封装

微光纤直接暴露在空气中极容易受到污染, 因此多数时候都会用低折射率聚合物封装保护, 在稳定几何结构的同时, 可以隔绝灰尘沾染、延长器件寿命。典型的低折射率聚合物材料包括特氟龙、紫外胶、聚二甲基硅氧烷 (PDMS)、气凝胶等^[29,35]。

但是微光纤谐振器对温度具有相当程度的敏感性, 使用低折射率聚合物封装后, 敏感性会同时取决于聚合物和光纤材料自身的热光效应以及热膨胀。尽管温度传感通常强调这一敏感性, 但对于其他应用而言这往往是干扰项, 故而研究者希望有一种简明的方式能够利用封装降低温度敏感性。南京大学的 Chen 等提出利用特氟龙负的热光系数, 通过控制微光纤几何尺寸与结构来进行匹配, 以抵消材料特性带来的温度影响, 实现微光纤谐振器的温度不敏感^[47]。微光纤在封装后的温度敏感度可以写作:

$$S = \frac{d\lambda_r}{dT} = S_{TOE,MF} + S_{TOE,LP} + S_{TEE,MF} + S_{TEE,LP}, \quad (37)$$

$$\begin{cases} S_{\text{TOE,MF}} = \left(\frac{\lambda_r}{n_{\text{eff}}}\right) \sigma_{\text{MF}} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{MF}}}\right) \\ S_{\text{TOE,LP}} = \left(\frac{\lambda_r}{n_{\text{eff}}}\right) \sigma_{\text{LP}} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial n_{\text{LP}}}\right) \\ S_{\text{TEE,MF}} = \left(\frac{\lambda_r}{n_{\text{eff}}}\right) \alpha_{\text{MF}} \left(n_{\text{eff}} + r_{\text{MF}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial r_{\text{MF}}}\right) \\ S_{\text{TEE,LP}} = \Gamma \alpha_{\text{LP}} \lambda_r \end{cases}, \quad (38)$$

其中: S_{TOE} 和 S_{TEE} 分别代表了热光效应和热膨胀的影响, σ 和 α 分别是热光系数和热膨胀系数, 下标 MF 代表微光纤, LP 代表封装使用的低折射率聚合物(如特氟龙)。微光纤半径用 r_{MF} 表示。SiO₂的热光系数 $\sigma_{\text{MF}} = 1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 热膨胀系数 $\alpha_{\text{MF}} = 5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, 特氟龙热光系数 $\sigma_{\text{LP}} \approx -1.3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, 热膨胀系数 $\alpha_{\text{LP}} \approx 0.8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 。在 $S_{\text{TEE,LP}}$ 中引入参数 $\Gamma(0 < \Gamma < 1)$ 来表征 α_{LP} 对微光纤环腔长的有效影响。计算表明 SiO₂热膨胀系数的贡献 $S_{\text{TEE,MF}}$ 很小可以忽略, 热光系数 $S_{\text{TOE,MF}}$ 的贡献约为 12 pm/°C~20 pm/°C。由于特氟龙的热光系数较 SiO₂ 大了一个数量级, $S_{\text{TOE,LP}}$ 这一项是主要影响因素, 同时忽略了 $S_{\text{TEE,LP}}$ 带来的横向的热膨胀影响。如图 10 展示了上述条件下, 温度敏感性随微光纤直径的变化。将 $|S| < 5 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 范围视为温度不敏感区, 则可以看出在部分直径区域, 特氟龙封装可以补偿其他的热效应, 实现温度不灵敏。基于该计算的实验也证实, 将一根直径 3 μm 左右的微光纤绕于表面涂有特氟龙的辅助棒上形成三圈耦合 MCR, 其温度灵敏度达到较低水平, $S < 6 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。

4 微光纤谐振器的典型应用

4.1 基于微光纤谐振器的传感器

4.1.1 折射率与物质浓度传感

微光纤谐振器最重要的应用之一就是传感器, 微光纤赋予的大倏逝场与器件的谐振特性可以大大增强传感的灵敏度^[48]。而最直接的传感方式, 莫过于折射率传感与基于折射率的物质浓度传感。对于直径在数微米到百纳米之间的微光纤来说, 其本质上是二氧化硅为纤芯、外界环境为包层的圆柱波导, 环境折射率的细微变化会直接影响波导的有效折射率, 从而进一步改变谐振器的谐振频率和 FSR 等参数, 导致谐振峰随外部环境的变化漂移, 进而实现传感。通常环境中物质浓度的变化会导致折射率改变, 因此折射率传感也可以进一步应用到浓度传感。

在 2007 年, 上海交通大学的 Shi 等人就从理论

角度证实了使用 MLR 进行环境折射率传感的可行性^[49]。2008 年, 来自南安普顿大学的 Brambilla 团队也从理论上提出并完善了基于 MCR 的折射率传感方案, 同时实验展示了 MCR 折射率传感器的性能, 实现了 40 nm/RIU(RIU, 折射率单位)的灵敏度^[50-51]。同年浙江大学的 Tong 团队则使用铜棒支撑的 MLR 浸没在溶液中, 实现了灵敏度达 109.7 nm/RIU 的折射率传感(图 11(a))^[52]。在此之后, 基于各种微光纤谐振器的浓度传感器层出不穷, 如 MLR 海水混合盐度传感器^[53]、MKR 与 Sagnac 环结合的酒精及多种醇类浓度传感器^[54]以及基于 MKR 的 NaCl 浓度传感器^[55-56]等, 均可达到较高的灵敏度和稳定性。

作为一种对日常生活具有指导意义的物质浓度, 湿度传感显得十分重要。2011 年, 电子科技大学的 Rao 团队利用 MKR 进行相对湿度传感^[57], 实验中使用了基于石英光纤和聚合物光纤的 MKR 样品, 分别实现了~12 pm/10% 和~88 pm/10% 的灵敏度以及 500 ms 的响应时间。此后其它基于 MLR^[58]和 MKR^[59]的相对湿度传感器也被演示。2018 年, 来自韩国汉阳大学的 Han 团队创新性地使用少模光纤拉制成的微光纤制备 MKR, 通过将含有高阶模信息的透射谱傅里叶变换到空间频域, 利用变换后的峰进行相对湿度传感, 实现了最大 $(0.99 \pm 0.011) \mu\text{m}^{-1}/\%$ 的灵敏度, 对应的常规谐振峰漂移则达到了 $(1.53 \pm 0.027) \text{ nm}/\%$ 灵敏度^[60]。

由于石英材料本身的限制, 如果相对特定物质进行特异性传感往往需要与功能性材料结合, 而近年来二维材料在探测领域也崭露头角。将二维材料与微光纤谐振器集成为混合模式波导^[61], 二维材料对某些物质的吸收会改变自身能带结构, 引起折射率变化, 从而导致混合模式的微光纤谐振器特性改变, 实现传感。2015 年, Rao 团队将氧化石墨烯附着于 MKR 上, 利用氧化石墨烯的特性实现了对氨气分子和一氧化碳分子的检测, 分别达到了 0.35 pm/ppm 和 0.17 pm/ppm 的灵敏度^[62], 如图 11(b) 所示。2019 年, 哈尔滨工程大学 Wang 团队则将 MCR 与黑磷结合, 实现了对 Pb²⁺离子的超高分辨率探测, 达到了 0.0285 ppb 的探测精度^[63]。

4.1.2 温度传感

微光纤的热光特性导致随温度谐振频率的改变, 为基于微光纤谐振器的温度传感创造了条件。2009 年, 浙江大学的 Zeng 等人就展示了基于聚合物封装

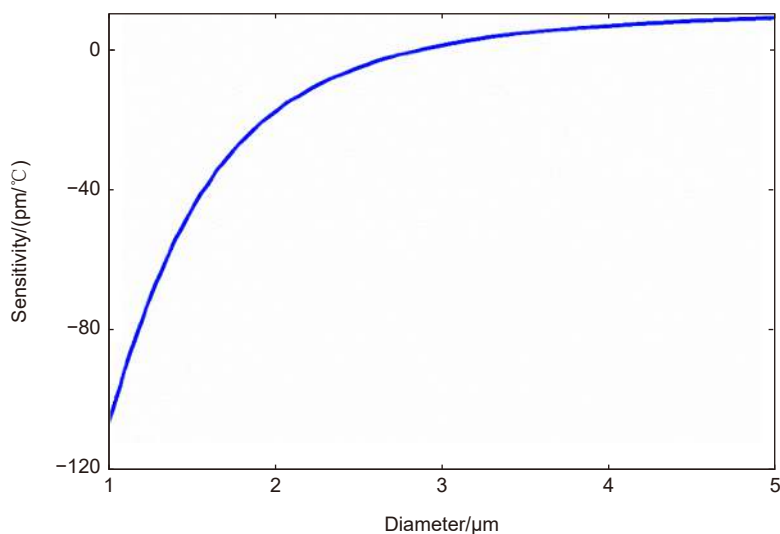


图 10 封装后温度敏感度随微光纤直径的变化

Fig. 10 Temperature sensitivity as a function of the microfiber radius after package

MKR 的温度传感器, 灵敏度达到 $0.28 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 且具有良好的回复性与稳定性^[65]。同年, Rao 团队用类似结构在达到 $266 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度同时实现了响应时间小于 1 ms 的高速特性, 如图 11(c)^[64]。此后又有马来西亚的 Harun 等人, 通过将温度传感区选定在 MLR 的耦合区, 通过观测耦合区热膨胀导致的谐振器透射谱对比度变化, 实现了灵敏度 $0.043 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 的温度传感^[66]。

由焦耳定律我们知道电流产生的焦耳热与其平方成正比, 因此温度传感往往可以进一步延伸为电流传感, 而微光纤谐振器的环结构使得其空心的中央恰好可以放置电流载体与谐振器作用。在 2011 年 Lim 等人就将铜棒置于 MKR 环中, 二者紧贴, 给铜棒通电产生的焦耳热使环膨胀, 从而导致谐振峰漂移, 实现了灵敏度 $51.3 \text{ pm}/\text{A}^2$ 的电流传感^[67]。通过改变环中央的导体材料, 可以进一步提升灵敏度。2014 年暨南大学的 Guan 团队通过将 MCR 缠绕在铬镍合金丝上, 将电流传感器灵敏度提升至 $220.65 \text{ nm}/\text{A}^2$ ^[68], 而 2015 年南京大学的 Xu 团队则通过 MCR 与石墨烯的集成, 将这一数值进一步提升至 $67.297 \text{ } \mu\text{m}/\text{A}^2$, 如图 11(d) 所示^[69]。

4.1.3 应力传感

封装于聚合物中微光纤谐振器也可以用作应力传感器。2017 年, 南京大学的 Xu 课题组提出了基于表面等离激元 (surface plasmon-polariton, SPP) 混合模式的微光纤结形谐振器 (hybrid-plasmonic MKR, HPMKR)^[33]。如图 11(e) 所示, HPMKR 由光滑金属

膜及附着其上的 MKR 组成, 在这个器件中存在着由金属表面的 SPP 模式和微光纤介电模式所激发的混合模式。该器件具有较好的偏振选择特性, 其偏振选择消光比在 1200 nm 到 1600 nm 的红外波段大于 15 dB ; 同时器件也具有较好的谐振特性, 在 1550 nm 波长处其 Q 值大于 52000 。利用 PDMS 将 HPMKR 封装起来, 将其作为压力传感器测试, 谐振波长的漂移与负载重量保持良好的线性关系, 并且样品具有良好的回复性, 压力灵敏度达到 $18.3 \text{ pm}/\text{g}$ ($51.2 \text{ pm}/\text{kPa}$)。此处共振波长偏移则主要由偏振和 PDMS 的弹光效应引起^[70]。除了静态压力响应, HPMKR 同样具有动态响应特性, 测试表明其可以在 60 Hz ~ 3000 Hz 的频率范围内能够对振动做出灵敏响应。

此后该团队又基于 HPMKR 制作了高灵敏度和可穿戴光学传感器, 该器件具有 PDMS-HPMKR-PDMS 的三明治结构^[71]。如图 11(f) 所示, 这一柔性器件能够响应低至 1% 的平面应变, 压力传感具有 0.83 kPa^{-1} 的高灵敏度, 可以检测到低至 30 Pa 的压力, 其响应上升沿时间小于 20 ms 。当贴在人体皮肤上时, 能够实时监测人体临床和生理信号, 如手腕脉搏、呼吸和手指脉搏等, 从而为低成本、高灵敏度的可穿戴式传感器提供一种可行的思路。

类似的器件也可以用于一些特殊场景, 如 2015 年 Birks 课题组就展示了基于 MKR 的光纤水听器 (图 11(g))^[39]。利用 MKR 对水压与振动的响应, 实现了在水下对 25 Hz ~ 300 Hz 声波信号的探测, 在 40 Hz 频率达到了 $-288 \text{ dB re } (\mu\text{Pa})^{-1}$ 的灵敏度。

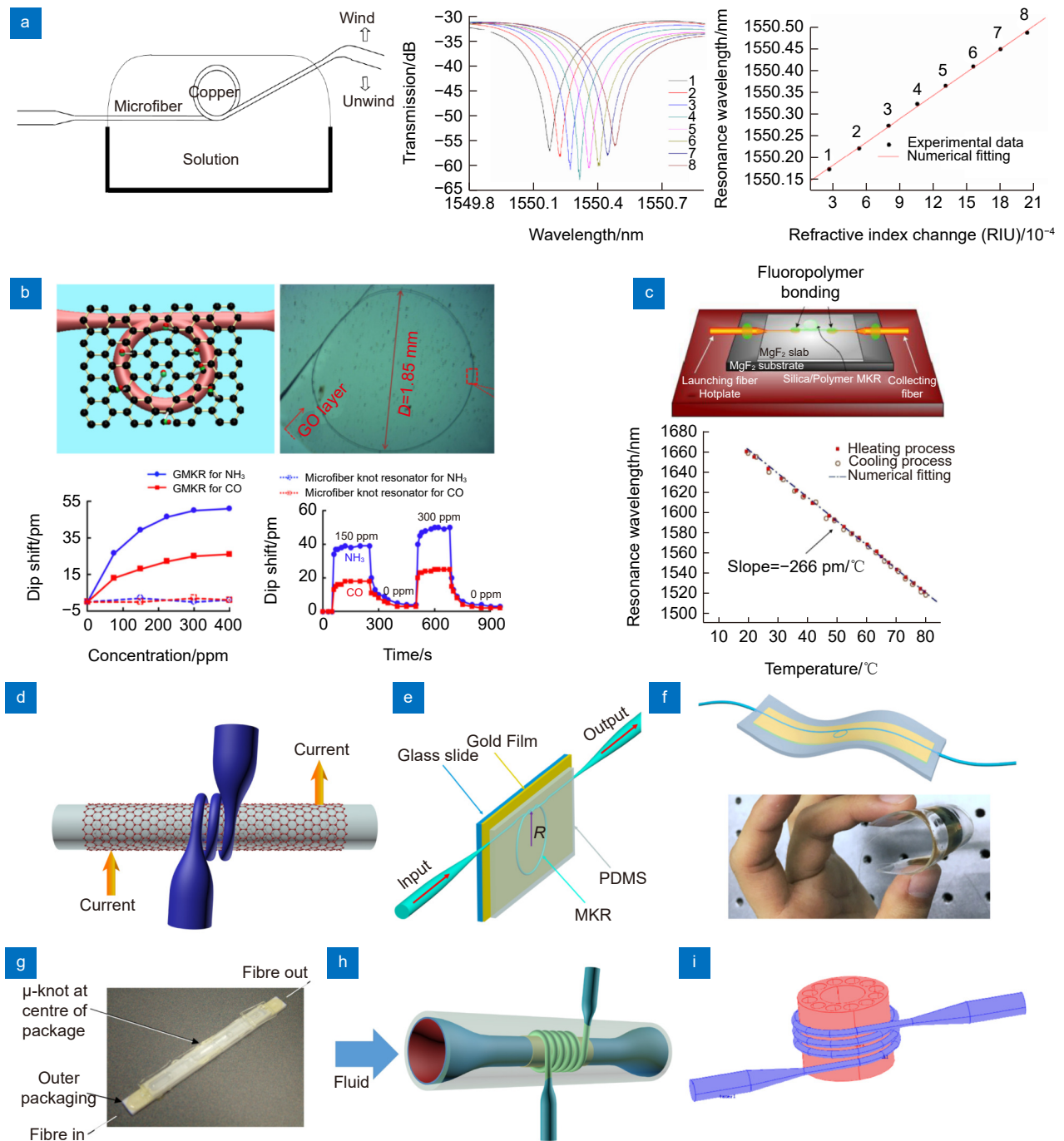


图 11 微光纤谐振器传感。

(a) 基于 MLR 的折射率传感器^[52]; (b) MKR 与氧化石墨烯集成的气体传感器^[62]; (c) 基于 MKR 的温度传感器^[64];
 (d) 基于石墨烯集成 MCR 的电流传感器; (e) 混合等离激元 MKR; (f) 柔性可穿戴 HPMKR 传感器;
 (g) 基于 MKR 的光纤水听器^[39]; (h) MCR 微流体传感器; (i) 基于 MCR 的三维立体光栅

Fig. 11 Sensors based on microfiber resonators.

(a) Refractometric sensor based on MLR^[52]; (b) Graphene oxide deposited MKR for gas sensing^[62]; (c) Temperature sensor based on MKR^[64];
 (d) Current sensor based on graphene-integrated MCR; (e) Hybrid-plasmonic MKR; (f) Soft and wearable HPMKR sensor;
 (g) Fiber hydrophone based on MKR^[39]; (h) Microfluidic sensor based on MCR;
 (i) 3D-stereo grating based on a microstructured rod with MCR

4.1.4 其它传感

除了前述的几种传感方式以外, 微光纤谐振器与一些特殊结构集成还可以实现更多的传感方式。如 Xu 等人提出的, 利用可以后期溶解的支撑棒绕制 MCR, 待封装之后将之溶解移除, 这样器件在具有可维持其几何形状的封装层同时获得了一个可以通气体或者液体的流动管道^[51], 如图 11(h) 所示。将这一管道用于物质流动, 微光纤谐振器的倏逝场直接作用到管道内实现目标物质监测或者流速测量。这种方案实现了光通道和流体通道的各自独立, 互不影响, 可以很好地实现微流体在线检测。此外, 若支撑棒选择具有周期孔状结构的类光子晶体或者微结构光纤制备 MCR, 可以形成立体表面等效光栅^[72], 如图 11(i) 所示, 该结构用来做高灵敏度的折射率传感时, 计算表明其灵敏度 $> 10^3$ nm/RIU。电子科技大学的 Wu 等则将 MKR 与微机电系统 (MEMS) 集成, 提出了 MOEMS 加速度计^[73], 该器件具有 0.029 nm/G 的光学灵敏度, 而电学灵敏度可达 654.7 mV/G, 响应范围 ± 25 G。此外, 也有研究者将 MKR 与磁流体结合^[74], 在 300 Oe 的磁场范围内实现了稳定线性响应。表 2 汇总了各类基于微光纤谐振器的传感器性能参数, 以供参考。

4.2 基于微光纤谐振器的信号处理

4.2.1 滤波器

光纤是光通信的核心组件, 与光纤系统兼容的微光纤谐振器在信号处理领域也有着广泛的应用。作为具有波长选择特性的器件, 其最直接的用途便是光滤波器。2008 年, 浙江大学的 Yu 等将 MLR 套在压电陶瓷棒上, 通过压电陶瓷的伸缩来改变谐振器的尺寸, 从而实现了可调谐的 MLR 滤波器^[75]。伊朗的 Arjmand 等于 2012 年基于 MCR 的滤波特性设计了一种波长选择光放大器^[76]。全光纤的兼容性也使得微光纤谐振器可以直接应用于通信领域, 有利用 MKR 滤波实现从 RZ 到 NRZ 码的全光转换^[77], 也有利用 MLR 与侧抛光纤耦合实现的上下载滤波器^[78], 以及 MKR 与铌酸锂波导耦合的上下载滤波器^[79] 等等。2020 年, 浙江大学的 Xie 等使用硫系玻璃光纤拉制的微光纤制备的 MKR, 成功实现了在 4.6 μm 中红外波段的滤波^[80]。

4.2.2 光调制器

谐振腔结构引入的长等效作用距离与微光纤的倏逝场使得微光纤谐振器成为开发光调制器的绝佳平台。

2014 年, 南京大学的 Chen 等人将传统制备 MCR 使用的 PMMA 支撑棒替换为镀有金属膜的棒, 使得微光纤的倏逝场与金属耦合, 从而形成等离激元混合模式波导(图 12(a)), 实现了对光偏振态进行调制的三维立体偏振器件, 偏振消光比超过 20 dB^[38]。此后他们又提出一种石墨烯-微光纤波导复合结构^[32], 如图 12(b) 所示, 该结构中石墨烯包覆在直径为毫米量级的支撑棒上, 然后将拉制好的微光纤缠绕到支撑棒表面, 形成 MCR。这一器件实现了宽带光纤起偏器、单模单偏振光纤谐振腔以全光开关的多功能应用, 其中全光调制深度达到 7.5 dB(图 12(c))^[81]。

由于光纤本身的材料局限性, 要实现微光纤谐振器的全光调制往往需要与功能性材料集成。最早基于 MKR 的全光调制便是与光敏液晶结合, 通过照射紫外光改变其有效折射率, 实现对 MKR 谐振的调制^[85]。此后二维材料的兴起使得这一领域进一步发展, 2017 年兰州大学的 Tian 团队用石墨烯将 MKR 从两面夹住形成三明治结构(图 12(d)), 使用 1530 nm 连续光泵浦下实现了 7.4 dB 的调制深度, 同时谐振峰也被连续调谐 0.78 nm^[82]。此后又有如图 12(e) 所示的 WS₂ 集成 MKR^[83]、MoTe₂ 集成 MKR^[86] 等全光调制器问世, 性能持续进步。2020 年, 深圳大学的 Zhang 团队展示了二维 Ti₂CT_x MXene 材料与 MKR 集成的全光调制器, 相位调制量达到 9.81 π , 同时该材料使得光调制器在转换效率和调制速度上具有显著优势, 响应时间达到 300 μs 量级^[87]。

除了全光调制之外, 也有研究者使用热调的方式, 将 MKR 与石墨烯集成, 使用叉指电极对石墨烯进行热调, 从而对输入 MKR 的光信号相位与强度进行调制, 调制量达到 2.1 π , 响应时间 90 μs 左右^[88]。

4.2.3 其它光信号处理应用

除了滤波与调制外, 微光纤谐振器在光信号处理与非线性领域的其它用途也被探索, 如图 12(f) 所示的基于 MCR 的光纤延迟线^[84], Gouveia 等人提出的基于 MLR 的二次谐波产生^[89] 以及 Ismael 等人提出的基于 MLR 的三次谐波产生^[90-92], 都展现了微光纤谐振器的广泛应用场景。表 3 对前述的各类光信号处理应用的性能参数进行了简要的汇总比较。

4.3 微光纤谐振器在光纤激光中的应用

微光纤谐振器在光纤激光器中的应用形式主要分为两类, 如图 13(a) 所示, 一类是谐振器本身同时作为激光器谐振腔, 通过掺杂或者染料让微光纤谐振器具

表 2 基于微光纤谐振器的传感器件
Table 2 Sensors based on microfiber resonators

谐振器类型	测量对象	灵敏度	参考文献
浓度传感			
MCR	异丙基浓度	40 nm/RIU	[51]
MLR	酒精浓度	17.8 nm/RIU	[52]
	甘油浓度	109.7 nm/RIU	
MLR	海水盐度	1000 nm/RIU 或 2 nm/‰	[53]
MKR	甲醇、乙醇、丙醇、异丙醇浓度	/	[54]
MKR	NaCl浓度	1.7 nm/‰	[55]
MKR	NaCl浓度	0.2 nm/‰	[56]
MKR	湿度	1.2 pm/‰ (石英光纤)	[57]
		8.8 pm/‰ (聚合物光纤)	
MLR	湿度	1.8 pm/‰	[58]
MKR	湿度	5.95 pm/‰	[59]
MKR	湿度	1.53 nm/‰	[60]
MKR	NH ₃ 分子浓度	0.35 pm/ppm	[62]
	CO分子浓度	0.17pm/ppm	
MCR	Pb ²⁺ 离子浓度	702 pm/ppm	[63]
温度传感			
MKR	温度	280 pm/°C	[65]
MKR	温度	266 pm/°C	[64]
MLR	温度	0.043 dB/°C	[66]
MKR	电流	0.0513 nm/A ²	[67]
MCR	电流	220.65 nm/A ²	[68]
MCR	电流	6.7297×10 ⁴ nm/A ²	[69]
应力传感			
MKR	压强	51.2 pm/kPa	[33]
MKR	压强	16.02 pm/kPa	[71]
MKR	压强	-288 dB re (μPa) ⁻¹	[39]
其它			
MKR	加速度	29 pm/G	[73]
MKR	磁场	~ 0.3 pm/Oe	[74]

有增益, 实现激光输出; 另一类则是将微光纤谐振器作为功能性器件置入环形光纤激光器腔中, 通过更复杂的调谐获得目标激光输出。最早在 2006 年, 浙江大学的 Jiang 就将铟镱共掺光纤拉制成的微光纤制成 MKR, 实现了单纵模 8 μW 的 1.5 μm 波段激光输出^[34], 之后又将基于普通光纤的 MKR 浸泡在罗丹明-6G 中, 实现了染料激光的输出^[46]。

在光纤激光器中, 微光纤谐振器扮演的首要角色依然是滤波器, 而其作用又分为两种: 单波长窄线宽

输出^[93]和多波长输出。2012 年, 华南理工大学的 Yang 团队使用基于铟镱共掺光纤 MKR 嵌套的结构进行滤波, 在 1536 nm 实现了 2 kHz 线宽, 38 dB 对比度的单频窄线宽激光输出^[94]。2016 年 Li 等人则使用 MKR 级联实现了线宽 0.016 nm, 对比度>60 dB 的单波长激光输出^[95]。2019 年, Yang 等将 MKR 与光纤光栅结合实现线宽 0.016 nm~0.019 nm 的单纵模输出^[96]。多波长激光则对各波长的均匀性有一定要求, 通常关注峰值 3 dB 带宽内输出的波长个数。在 1.5

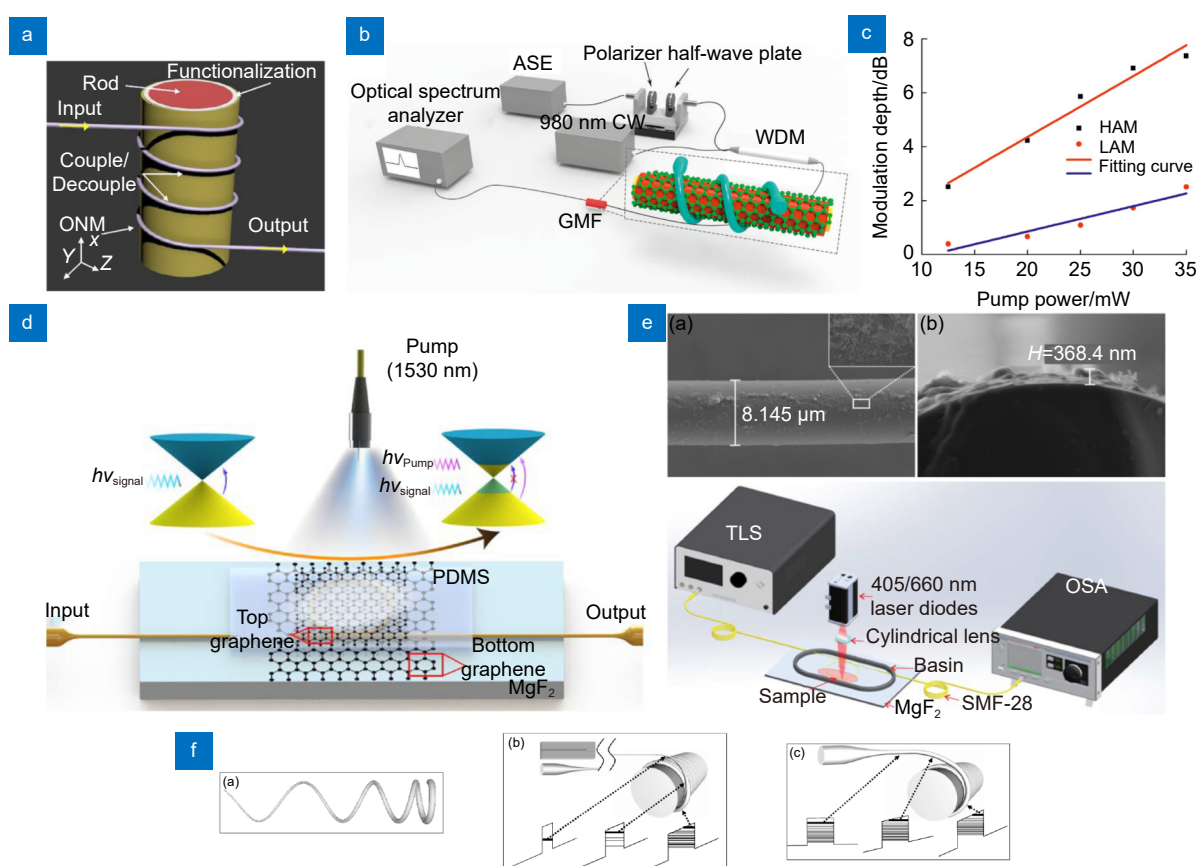


图 12 光信号处理。

(a) MCR 宽带起偏器^[38]; (b) 石墨烯集成 MCR 全光调制器^[81]; (c) 石墨烯集成 MCR 全光调制器的偏振相关调制^[81];
(d) 石墨烯集成 MKR 全光调制器^[82]; (e) WS_2 集成 MKR 全光调制器^[83]; (f) MCR 光延迟线^[84]

Fig. 12 Optical signal processing.

(a) MCR broad band polarizer^[38]; (b) Graphene-integrated MCR all-optical modulator^[81]; (c) Polarization-dependent modulation of graphene-integrated MCR all-optical modulator^[81]; (d) Graphene-integrated MKR all-optical modulator^[82];
(e) WS_2 -integrated MKR all-optical modulator^[83]; (f) MCR delay line^[84]

μm 波段, 2014 年 Liu 等人将 MKR 与光纤起偏器级联实现的 11 个波长的均匀输出^[97], 2017 年 Xu 等将 MKR 与 Sagnac 环结合实现了 42 波长输出^[98], 而 Zheng 等则将 MKR 作为输出多波长激光的工具, 集成到研究光纤涡旋光的激光光路中去^[99], 输出最多 4 通道 0.018 nm 线宽的激光。在 2 μm 波段, 2018 年 Li 等则使用黑磷集成的 MCR 实现了 1883 nm 附近 12 波长输出^[100], 之后又有 Deng 等人用 MKR 实现 1965 nm 附近 3 波长输出^[101]。

微光纤谐振器由于具有易与功能性材料集成的优势, 因此也被应用于锁模脉冲激光领域^[102]。由于谐振器滤波特性的存在, 基于微光纤谐振器的锁模激光往往呈现较为特殊的输出态, 极大丰富了锁模激光的动力学。2018 年, Wang 团队将 MKR 与 WS_2 结合应

用于光纤激光器, 在 1535 nm 附近实现了 7 波长、16.3 ps 脉宽的多波长锁模脉冲输出^[103]。同年华南师范大学的 Luo 团队使用吸附了石墨烯碎片的 MKR, 实现了耗散四波混频锁模, 在 1 μm 和 1.5 μm 波段都输出了百 GHz 以上超高重频的脉冲^[104]。2020 年, 韩国的 Yong-Won Song 课题组将 MLR 与生长在铜棒上的石墨烯集成, 在实现耗散四波混频锁模的同时通过给铜棒通电进行热调, 实现了 GHz 重复频率的调谐^[105]。另一方面, 南京大学的 Xu 课题组则挖掘偏振对锁模的作用, 利用附着在金膜上的 MKR 形成的高偏振的混合等离激元谐振器件, 实现了基于非线性偏振旋转激发的耗散四波混频锁模^[40]。此后又将金膜替换为少层石墨烯, 实现了调 Q、孤子锁模到耗散四波混频锁模的多态激光输出^[106]。

表 3 基于微光纤谐振器的光信号处理

Table 3 Signal processing based on microfiber resonators

谐振器类型	应用方式	性能参数					参考文献
		滤波器					
		工作波长/nm	FSR/nm	精细度	对比度/dB	插损/dB	
MLR	滤波	840	3.2~3.8	4.3	10	0.97	[75]
MKR	通信码型转换	1550	0.32~0.64	/	>10	8	[77]
MLR	上下载滤波	1550	0.3~0.64	4~6.5	3.7~7.5	2.5	[78]
MKR	滤波	4600	2~9.6	10.2	4~8	>4	[80]
		调制器					
		工作波长/nm	调制深度/dB	调制效率/(dB/mW)	上升/下降时间/ms		
MCR	全光调制	1550	7.5	0.2	/		[81]
MKR	全光调制	1550	7.4	0.02	/		[82]
MKR	全光调制	1550	17.1	0.4	120/100		[83]
MKR	全光调制	1550	12.7	0.5	2.8/3.3		[86]
MKR	全光调制	1550	12.9	0.26	0.306/0.301		[87]
MKR	热光调制	1550	13.4	/	0.0908/0.0897		[88]
		非线性					
		泵浦光波长/nm	信号光波长/nm	转换效率	谐振腔增强因子		
MLR	二次谐波产生	1550	775	2.4×10^{-7}	5.7		[89]
MLR	三次谐波产生	1550	516.7	1.8×10^{-5}	5.9		[90]

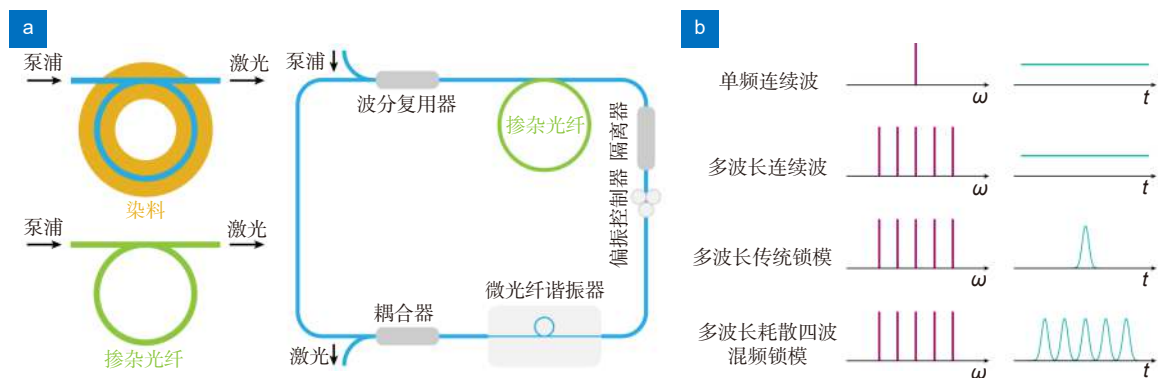


图 13 应用于光纤激光器的微光纤谐振器。

(a) 微光纤谐振器的激光应用形式; (b) 基于微光纤谐振器的光纤激光器运转模式

Fig. 13 Application of microfiber resonators in fiber laser.

(a) Application schemes of microfiber-resonator-based fiber laser; (b) Operation regimes of microfiber-resonator-based fiber laser

综上, 图 13(b) 展示了微光纤谐振器应用于激光器输出的几种典型运转模式示意图, 其中红色曲线代表了光频域(光谱)的输出特性, 蓝色曲线代表了相应的时域输出特性。从滤波器的角度微光纤谐振器可以在频域实现单波长和多波长的输出, 如左面一系列的光谱示意。由于单频滤波意味着窄带宽和少纵模, 因而往往在时域对应连续波输出, 无法实现调 Q 或是锁模的脉冲调制。而宽带滤波如果没有引

入损耗调制机制, 则表现为多波长连续光源。当宽带滤波与饱和吸收材料结合时, 根据谐振器 Q 值决定的滤波线宽的不同, 可以在时域实现多波长传统锁模脉冲(大线宽, 多纵模)或者多波长耗散四波混频高重频锁模脉冲(窄线宽, 且有效相干)等多种复杂的调制, 充分展现了其在激光与超快光学领域的应用价值与前景。相关工作的性能参数汇总于表 4 以供比较参照。

表 4 基于微光纤谐振器的光纤激光
Table 4 Fiber laser based on microfiber resonators

谐振器类型	性能参数				参考文献	
	单波长激光器					
	中心波长/nm	线宽/pm	对比度/dB	输出功率/ μ W		
MKR	1541.1	50	47	8	[34]	
MKR	1536	3.2×10^{-4}	38	0.9575	[94]	
MKR	1560.6	16	60	/	[95]	
MKR	1550.772	16	60.6	8×10^3	[96]	
多波长连续激光器						
	中心波长/nm	FSR/nm	波长通道数			
MKR	567~580	0.21	6		[46]	
MKR	1528.3~1561.3	0.184	11		[97]	
MKR	1564	0.09	42		[98]	
MKR	1546.95~1562.29	0.813	1~4		[99]	
MCR	1882.5	0.54	12		[100]	
MKR	1965	5.8	3		[101]	
多波长脉冲激光器						
	中心波长/nm	FSR/nm	波长通道数	重复频率	脉宽/ps	
MKR	1535	1.12	7	5.3 MHz	16.3	[103]
MKR	1045	0.59	4	162 GHz	<6.17	[104]
	1561	0.86	6	106.7 GHz	<9.37	
MKR	1560	0.33~1.16	>3	41 GHz~144 GHz	6.6	[40]
MLR	1555	0.46	>3	57.8 GHz	3.4	[105]
MKR	1533	0.22	15	27.4 GHz	1.55	[106]
	1548		/	15.5/140 MHz	1.36/1.45	

5 结 语

基于微光纤的谐振器件具有卓越的光学和机械特性, 为全光纤、微型化的探测与调制应用提供了广阔的平台支撑。其低插入损耗、高品质因子、全光纤兼容性以及易于制备的优势, 通过进一步与外部功能性材料和各种微纳加工技术结合, 使得在微光纤谐振器上实现“纤环实验室”成为可能, 无论是在传感、滤波、调制或者激光等实用领域, 还是量子光学、非线性光学等研究领域, 都可以实现丰富多彩的结构与功能。而除了基于石英微光纤的谐振器, 其它基于磷酸盐光纤、氟化物光纤、硫化物光纤、聚合物光纤的微光纤谐振器也在拓展器件在非线性和中红外波段领域应用的边界。目前, 愈加复杂和精细化的应用使得微光纤谐振器逐渐成为光学、材料学、电子学、力学乃至生物学交叉的领域, 进一步探索其潜在应用以及新的物理效应, 仍将是有意而又机遇和挑战并存的方向。

参考文献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies[J]. *Proc Inst Electr Eng*, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [2] Agrawal G P. *Fiber-Optic Communication Systems*[M]. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2010.
- [3] Agrawal G P. *Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. San Diego: Academic Press, 2001.
- [4] Yamane M, Asahara Y. *Glasses for Photonics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] Tong L, 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.
- [6] Leon-Saval S G, Birks T A, Wadsworth W J, et al. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides[J]. *Opt Express*, 2004, 12(13): 2864-2869.
- [7] Birks T A, Kakarantzias G, Russell P S J. All-fibre devices based on tapered fibres[C]//*Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, 2004: Thk2.
- [8] Sumetsky M, Dulashko Y, Hale A. Fabrication and study of bent and coiled free silica nanowires: self-coupling microloop optical interferometer[J]. *Opt Express*, 2004, 12(15): 3521-3531.
- [9] Brambilla G, Finazzi V, Richardson D J. Ultra-low-loss optical

- fiber nanotapers[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(10): 2258–2263.
- [10] Brambilla G, Xu F, Horak P, et al. Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications[J]. *Adv Opt Photon*, 2009, **1**(1): 107–161.
- [11] Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review [J]. *J Opt*, 2010, **12**(4): 043001.
- [12] Diddams S A, Vahala K, Udem T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2020, **369**(6501): eaay3676.
- [13] Strekalov D V, Yu N. Generation of optical combs in a whispering gallery mode resonator from a bichromatic pump[J]. *Phys Rev A*, 2009, **79**(4): 041805.
- [14] Suh M G, Yang Q F, Yang K Y, et al. Microresonator soliton dual-comb spectroscopy[J]. *Science*, 2016, **354**(6312): 600–603.
- [15] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Tunable optical frequency comb with a crystalline whispering gallery mode resonator[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**(9): 093902.
- [16] Levy J S, Gondarenko A, Foster M A, et al. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects[J]. *Nat Photonics*, 2010, **4**(1): 37–40.
- [17] Pasquazi A, Peccianti M, Razzari L, et al. Micro-combs: a novel generation of optical sources[J]. *Phys Rep*, 2018, **729**: 1–81.
- [18] Caspar C, Bachus E J. Fibre-optic micro-ring-resonator with 2 mm diameter[J]. *Electron Lett*, 1989, **25**(22): 1506–1508.
- [19] Jiang X S, Chen Y, Vienne G, et al. All-fiber add–drop filters based on microfiber knot resonators[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(12): 1710–1712.
- [20] Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M, et al. Optical microfiber loop resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **86**(16): 161108.
- [21] Xu F, Brambilla G. Embedding optical microfiber coil resonators in Teflon[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(15): 2164–2166.
- [22] Sumetsky M. Optical fiber microcoil resonator[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(10): 2303–2316.
- [23] Xu F, Horak P, Brambilla G. Conical and biconical ultra-high-Q optical-fiber nanowire microcoil resonator[J]. *Appl Opt*, 2007, **46**(4): 570–573.
- [24] Xu F, Horak P, Brambilla G. Optimized design of microcoil resonators[J]. *J Lightwave Technol*, 2007, **25**(6): 1561–1567.
- [25] Xu F. Optical fibre nanowire devices[D]. Southampton: University of Southampton, 2008.
- [26] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. *Opt Express*, 2004, **12**(6): 1025–1035.
- [27] Okamoto K. *Fundamentals of Optical Waveguides*[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2006.
- [28] Schwelb O. Transmission, group delay, and dispersion in single-ring optical resonators and add/drop filters - a tutorial overview[J]. *J Lightwave Technol*, 2004, **22**(5): 1380–1394.
- [29] Vienne G, Li Y H, Tong L M. Effect of host polymer on microfiber resonator[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, **19**(18): 1386–1388.
- [30] Jung Y, Murugan G S, Brambilla G, et al. Embedded optical microfiber coil resonator with enhanced high-Q[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, **22**(22): 1638–1640.
- [31] Hsieh Y C, Peng T S, Wang L A. Millimeter-sized microfiber coil resonators with enhanced quality factors by increasing coil numbers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, **24**(7): 569–571.
- [32] Kou J L, Chen J H, Chen Y, et al. Platform for enhanced light–graphene interaction length and miniaturizing fiber stereo devices[J]. *Optica*, 2014, **1**(5): 305–310.
- [33] Li J H, Chen J H, Yan S C, et al. Versatile hybrid plasmonic microfiber knot resonator[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(17): 3395–3398.
- [34] Jiang X S, Yang Q, Vienne G, et al. Demonstration of microfiber knot laser[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(14): 143513.
- [35] Sumetsky M, Dulashko Y, Fishteyn M. Demonstration of a multi-turn microfiber coil resonator[C]//*Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, Anaheim, 2007: PDP46.
- [36] Xu F, Brambilla G. Manufacture of 3-D microfiber coil resonators[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, **19**(19): 1481–1483.
- [37] Xiao L M, Birks T A. High finesse microfiber knot resonators made from double-ended tapered fibers[J]. *Opt Lett*, 2011, **36**(7): 1098–1100.
- [38] Chen J H, Chen Y, Chen W, et al. Multifunctional optical nanofiber polarization devices with 3D geometry[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(15): 17890–17896.
- [39] De Freitas J M, Birks T A, Rollings M. Optical micro-knot resonator hydrophone[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(5): 5850–5860.
- [40] Ding Z X, Huang Z N, Chen Y, et al. All-fiber ultrafast laser generating gigahertz-rate pulses based on a hybrid plasmonic microfiber resonator[J]. *Adv Photonics*, 2020, **2**(2): 026002.
- [41] Tong L M, Hu L L, Zhang J J, et al. Photonic nanowires directly drawn from bulk glasses[J]. *Opt Express*, 2006, **14**(1): 82–87.
- [42] Birks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers[J]. *J Lightwave Technol*, 1992, **10**(4): 432–438.
- [43] Knight J C, Cheung G, Jacques F, et al. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper[J]. *Opt Lett*, 1997, **22**(15): 1129–1131.
- [44] Brambilla G, Xu F, Feng X. Fabrication of optical fibre nanowires and their optical and mechanical characterisation[J]. *Electron Lett*, 2006, **42**(9): 517–519.
- [45] Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M, et al. The microfiber loop resonator: theory, experiment, and application[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, **24**(1): 242–250.
- [46] Jiang X S, Song Q H, Xu L, et al. Microfiber knot dye laser based on the evanescent-wave-coupled gain[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**(23): 233501.
- [47] Chen Y, Xu F, Lu Y Q. Teflon-coated microfiber resonator with weak temperature dependence[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(23): 22923–22928.
- [48] Gomes A D, Frazão O. Microfiber knot resonators as sensors: a review[C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Photonics*, Porto, 2017: 356–364.
- [49] Shi L, Xu Y H, Tan W, et al. Simulation of optical microfiber loop resonators for ambient refractive index sensing[J]. *Sensors*, 2007, **7**(5): 689–696.
- [50] Xu F, Prunerì V, Finazzi V, et al. An embedded optical

- nanowire loop resonator refractometric sensor[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(2): 1062–1067.
- [51] Xu F, Brambilla G. Demonstration of a refractometric sensor based on optical microfiber coil resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(10): 101126.
- [52] Guo X, Tong L M. Supported microfiber loops for optical sensing[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(19): 14429–14434.
- [53] Wang S S, Wang J, Li G X, et al. Modeling optical microfiber loops for seawater sensing[J]. *Appl Opt*, 2012, **51**(15): 3017–3023.
- [54] Chiama Y S, Limb K S, Harun S W, et al. Conducting polymer coated optical microfiber sensor for alcohol detection[J]. *Sens Actuators A Phys*, 2014, **205**: 58–62.
- [55] Yu H Q, Xiong L B, Chen Z H, et al. Solution concentration and refractive index sensing based on polymer microfiber knot resonator[J]. *Appl Phys Express*, 2014, **7**(2): 022501.
- [56] Liao Y P, Wang J, Yang H J, et al. Salinity sensing based on microfiber knot resonator[J]. *Sens Actuators A Phys*, 2015, **233**: 22–25.
- [57] Wu W, Zhang T H, Rao Y J, et al. Miniature interferometric humidity sensors based on silica/polymer microfiber knot resonators[J]. *Sens Actuators B Chem*, 2011, **155**(1): 258–263.
- [58] Zheng Y Z, Dong X Y, Zhao C L, et al. Relative humidity sensor based on microfiber loop resonator[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2013, **2013**: 815930.
- [59] Tian Q, Yang H Z, Rong Q Z, et al. Highly sensitive micro-hygrometer based on microfiber knot resonator[J]. *Opt Commun*, 2019, **431**: 88–92.
- [60] Le A D D, Han Y G. Relative humidity sensor based on a few-mode microfiber knot resonator by mitigating the group index difference of a few-mode microfiber[J]. *J Lightwave Technol*, 2018, **36**(4): 904–909.
- [61] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nat Photonics*, 2008, **2**(8): 496–500.
- [62] Yu C B, Wu Y, Liu X L, et al. Graphene oxide deposited microfiber knot resonator for gas sensing[J]. *Opt Mater Express*, 2016, **6**(3): 727–733.
- [63] Yin Y, Li S, Wang S B, et al. Ultra-high-resolution detection of Pb^{2+} ions using a black phosphorus functionalized microfiber coil resonator[J]. *Photonics Res*, 2019, **7**(6): 622–629.
- [64] Wu Y, Rao Y J, Chen Y H, et al. Miniature fiber-optic temperature sensors based on silica/polymer microfiber knot resonators[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(20): 18142–18147.
- [65] Zeng X, Wu Y, Hou C L, et al. A temperature sensor based on optical microfiber knot resonator[J]. *Opt Commun*, 2009, **282**(18): 3817–3819.
- [66] Harun S W, Lim K S, Damanhuri S S A, et al. Microfiber loop resonator based temperature sensor[J]. *J Eur Opt Soc Rapid Publ*, 2011, **6**: 11026.
- [67] Lim K S, Harun S W, Damanhuri S S A, et al. Current sensor based on microfiber knot resonator[J]. *Sens Actuators A Phys*, 2011, **167**(1): 60–62.
- [68] Xie X D, Li J, Sun L P, et al. A high-sensitivity current sensor utilizing CrNi wire and microfiber coils[J]. *Sensors*, 2014, **14**(5): 8423–8429.
- [69] Yan S C, Zheng B C, Chen J H, et al. Optical electrical current sensor utilizing a graphene-microfiber-integrated coil resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2015, **107**(5): 053502.
- [70] Tarjány N, Turek I, Martinček I. Effect of mechanical stress on optical properties of polydimethylsiloxane II – Birefringence [J]. *Opt Mater*, 2014, **37**: 798–803.
- [71] Li J H, Chen J H, Xu F. Sensitive and wearable optical microfiber sensor for human health monitoring[J]. *Adv Mater Technol*, 2018, **3**(12): 1800296.
- [72] Xu F, Brambilla G, Lu Y Q. A microfluidic refractometric sensor based on gratings in optical fibre microwires[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(23): 20866–20871.
- [73] Wu Y, Zeng X, Rao Y J, et al. MOEMS accelerometer based on microfiber knot resonator[C]//*Proceedings of SPIE 7503, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, Edinburgh, 2009: 75036U.
- [74] Li X L, Ding H. All-fiber magnetic-field sensor based on microfiber knot resonator and magnetic fluid[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(24): 5187–5189.
- [75] Wu Y, Zeng X, Hou C L, et al. A tunable all-fiber filter based on microfiber loop resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(19): 191112.
- [76] Arjmand M, Ahmadi V, Karimi M. Wavelength-selective optical amplifier based on microfiber coil resonators[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, **30**(16): 2596–2602.
- [77] Zhang Y, Xu E M, Huang D X, et al. All-optical format conversion from RZ to NRZ utilizing microfiber resonator[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2009, **21**(17): 1202–1204.
- [78] Yu J H, Jin S S, Wei Q S, et al. Hybrid optical fiber add-drop filter based on wavelength dependent light coupling between micro/nano fiber ring and side-polished fiber[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**: 7710.
- [79] Zhou S X, Wang Y, He D H, et al. Add-drop filter based on wavelength-dependent light interlink between lithium-niobate microwaveguide chip and microfiber knot ring[J]. *Crystals*, 2016, **6**(6): 67.
- [80] Xie Y, Cai D W, Wu H, et al. Mid-infrared chalcogenide microfiber knot resonators[J]. *Photonics Res*, 2020, **8**(4): 616–621.
- [81] Chen J H, Zheng B C, Shao G H, et al. An all-optical modulator based on a stereo graphene–microfiber structure[J]. *Light Sci Appl*, 2015, **4**(12): e360.
- [82] Meng Y H, Deng L, Liu Z L, et al. All-optical tunable microfiber knot resonator with graphene-assisted sandwich structure[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(15): 18451–18461.
- [83] Chen G W, Zhang Z J, Wang X L, et al. Highly sensitive all-optical control of light in WS_2 coated microfiber knot resonator [J]. *Opt Express*, 2018, **26**(21): 27650–27658.
- [84] Sumetsky M. Optical microfiber coil delay line[J]. *Opt Express*, 2009, **17**(9): 7196–7205.
- [85] Chen Z, Hsiao V K S, Li X Q, et al. Optically tunable microfiber-knot resonator[J]. *Opt Express*, 2011, **19**(15): 14217–14222.
- [86] Lu H H, Tao J, Chen L, et al. All-optical tuning of micro-resonator overlaid with $MoTe_2$ nanosheets[J]. *J Lightwave Technol*, 2019, **37**(14): 3637–3646.
- [87] 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]. *Adv Opt Mater*, 2020, **8**(7): 1900977.
- [88] Wang Y Z, Wu Q, Wang H D, et al. Thermally tunable

- microfiber knot resonator with flexible graphene heater[J]. *Chin Opt Lett*, 2021, **19**(5): 051301.
- [89] Gouveia M A, Lee T, Ismaeel R, et al. Second harmonic generation and enhancement in microfibers and loop resonators[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **102**(20): 201120.
- [90] Ismaeel R, Lee T, Ding M, et al. Nonlinear microfiber loop resonators for resonantly enhanced third harmonic generation[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(24): 5121–5123.
- [91] Lee T, Broderick N G R, Brambilla G. Resonantly enhanced third harmonic generation in microfiber loop resonators[J]. *J Opt Soc Am B*, 2013, **30**(3): 505–511.
- [92] Ismaeel R, Lee T, Ding M, et al. Optical microfiber passive components[J]. *Laser Photonics Rev*, 2013, **7**(3): 350–384.
- [93] Sulaiman A, Harun S W, Ahmad F, et al. Electrically tunable microfiber knot resonator based erbium-doped fiber laser[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, **48**(4): 443–446.
- [94] Fan W, Gan J L, Zhang Z S, et al. Narrow linewidth single frequency microfiber laser[J]. *Opt Lett*, 2012, **37**(20): 4323–4325.
- [95] Li Y, Xu Z L, Sun Q Z, et al. A single longitudinal mode fiber ring laser based on cascaded microfiber knots filter[C]//*Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, 2016: SM2P. 8.
- [96] Yang A, Wang T, Zheng J Q, et al. A single-longitudinal-mode narrow-linewidth dual-wavelength fiber laser using a microfiber knot resonator[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, **16**(2): 025104.
- [97] Liu M, Liu H, Zheng X W, et al. Demonstration of multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a microfiber knot resonator[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2014, **26**(14): 1387–1390.
- [98] Xu Y P, Ren L Y, Ma C J, et al. Stable and uniform multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a microfiber knot resonator with a Sagnac loop reflector[J]. *J Opt*, 2017, **46**(4): 420–424.
- [99] Zheng J Q, Yang A, Wang T, et al. Wavelength-switchable vortex beams based on a polarization-dependent microknot resonator[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(5): 396–402.
- [100] Li S, Yin Y, Lewis E, et al. A twelve-wavelength Thulium-doped fibre laser based on a microfiber coil resonator incorporating black phosphorus[J]. *Opt Commun*, 2019, **437**: 342–345.
- [101] Deng Y D, Zhou Y, Yin T C, et al. Stable multiwavelength Tm-doped fiber laser with a microfiber knot resonator[J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2020, **62**(1): 555–558.
- [102] Li C, Chen J H, Yan S C, et al. A fiber laser using graphene-integrated 3-D microfiber coil[J]. *IEEE Photonics J*, 2016, **8**(1): 1500307.
- [103] Li S, Yi Y T, Yin Y, et al. A microfiber knot incorporating a tungsten disulfide saturable absorber based multi-wavelength mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *J Lightwave Technol*, 2018, **36**(23): 5633–5639.
- [104] Liu M, Tang R, Luo A P, et al. Graphene-decorated microfiber knot as a broadband resonator for ultrahigh-repetition-rate pulse fiber lasers[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(10): C1–C7.
- [105] Lee S, Song Y W. Graphene self-phase-lockers formed around a Cu wire hub for ring resonators incorporated into 57.8 gigahertz fiber pulsed lasers[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(11): 15944–15952.
- [106] Ding Z X, Chen Y, Xu F. Multifunctional all-fiber mode-locked laser based on graphene-integrated polarization-dependent microfiber resonator[J]. *Opt Laser Technol*, 2021, **143**: 107381.

作者简介



丁梓轩(1996-), 男, 博士研究生, 从事面向光纤激光器的新型光纤器件的研究。

E-mail: zxding@smail.nju.edu.cn



陈焯(1986-), 男, 博士, 副研究员, 从事光纤微纳器件与应用的相关研究工作。

E-mail: yechen@nju.edu.cn

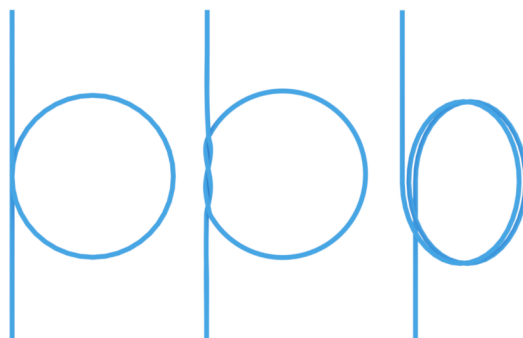


【通信作者】徐飞(1978-), 男, 博士生导师, 教授, 先后获得国家基金委“杰出青年基金”, “优秀青年基金”资助, 主要从事光电器件、光纤激光和光学测量等相关领域的研究。

E-mail: feixu@nju.edu.cn

Optical microfiber resonator: principle and applications

Ding Zixuan, Chen Ye, Xu Fei*



Microfiber-based resonators

Overview: Microfibers tapered from conventional optical fibers with diameters ranging from hundreds of nanometers to several micrometers possess various advantages including large evanescent field, strong light confinement, high optical nonlinearity, flexible configurability, and low-loss connection to other fiberized system, which makes it an open platform for miniaturization and integration of all-fiber devices. Nowadays microfiber can be easily obtained through mature fabrication method like flame-brushing technique. On the other hand, as a fundamental opto-electronic component, optical resonators have got comprehensively researched and widely applied in the fields of optical communication, sensing, signal processing, and quantum photonics, including whispering-gallery-mode cavities like micro-ring, micro-cylinder, micro-toroid, and micro-sphere. These traditional optical resonators are fabricated through lithography which is relatively complicated. With the maturation of microfiber fabrication methods, optical resonators based on optical microfibers have been demonstrated and developed, such as microfiber loop resonators, microfiber knot resonators, and microfiber coil resonator. As an optical coupling device based on evanescent field coupling, the microfiber resonator features in low insertion loss, high Q-factor, high finesse, excellent mechanical stability, easy fabrication process, and compatibility with fiber systems, providing a broad platform for all-fiberized miniaturized devices of probing and modulation. Through further integration with exterior functional materials and microfabrication techniques, a microfiber resonator can be utilized in diverse domains of sensor, filter, modulator, and fiber laser, as well as quantum photonics and nonlinear optics, realizing the ‘lab on fiber-ring’. In the field of sensing, the microfiber resonators get exploited as the refractometric sensor, concentration and humidity sensor, temperature and current sensor, mechanical pressure sensor, microfluidic sensor, magnetic field sensor, acceleration sensor, etc., where the devices exhibit high adaptability and excellent sensitivity. As to optical signal processing, the device can be used as the single wavelength or multi-wavelength filter, code-type conversion, and optical modulation. The intensity and phase of light can be tuned to a large scale within broad wavebands, and the modulation response time is also reduced to achieve high-speed modulation. Furthermore, the microfiber resonator can be used as an optical delay line or generator of second harmonic or third harmonic. When applied into fiber laser, the microfiber resonators help build the stable light source with narrow linewidth single frequency or multiwavelength laser with high uniformity. The devices integrated with metal or 2D materials also make the laser operate under conventional soliton mode-locking or dissipative four-wave-mixing mode-locking regime and output sub-picosecond pulsation, broadening the dynamics of ultrafast optics. In this article, we summarize the recent progress in the microfiber resonators research fields, covering fundamental principles and characteristics, fabrication methods, and applications of microfiber resonators.

Ding Z X, Chen Y, Xu F. Optical microfiber resonator: principle and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(8): 220006; DOI: 10.12086/oe.2022.220006

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62135007)

College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

* E-mail: feixu@nju.edu.cn