

微纳光纤及其应用*

伍晓芹 王依霏 童利民[†]

(浙江大学光电信息工程学系 现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

2015-05-07 收到

[†] email: phytong@zju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20150602

Optical microfibers and their applications

WU Xiao-Qin WANG Yi-Pei TONG Li-Min[†]

(Department of Optical Engineering, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

摘要 微纳光纤是一种直径接近或小于传输光波长的波导, 由物理拉伸方法制得, 具有表面光滑、直径均匀性好、机械性能高、强光场约束、强倏逝场、表面场增强效应及反常波导色散等特性, 在光通信、激光、传感检测、非线性光学、量子光学等领域具有重要的应用前景。

关键词 微纳光纤, 光波导, 纳米光子学, 近场耦合, 传感器, 发光器件, 非线性光学, 原子光学, 量子光学

Abstract Optical microfibers and nanofibers have diameters close to or smaller than the wavelength of the guided light. Fabricated by physical drawing of glass or polymer materials, these tiny fibers show excellent surface smoothness and diameter uniformity, high mechanical strength, tight optical confinement, strong evanescent field, significant surface field enhancement, and large and abnormal waveguide dispersion, which bestow them with a variety of applications in fields ranging from optical communication, laser technology, sensors, nonlinear optics, and quantum optics.

Keywords micro-nano fiber, optical waveguides, nanophotonics, near-field coupling, sensors, light emitting devices, nonlinear optics, atom optics, quantum optics

1 引言

作为光纤光学与纳米技术的完美结合, 微纳光纤是近年来发展起来的光纤光学及微纳光子学等领域的前沿研究方向之一^[1-6]。与传统光纤相比, 微纳光纤的直径通常接近或小于传输的光波长, 而且纤芯包层折射率差很大, 具有下列新颖的光学传输特性(见图1):

(1) 强光场约束。微纳光纤具有强光场约束能力, 其传输光束的等效模场截面尺寸一般在 λ/n 的量级(其中 λ 为传输光的真空波长, n 为光纤材料的折射率), 在低阈值非线性效应^[7-9]及低功耗光子器件等方面得到了广泛关注和研究。同时, 强光场约束使得微纳光纤具有微米量级的低损耗弯曲半径^[10], 在器件小型化及高密度、短距离光互联等方面具有潜在优势。此外, 亚波长尺度上的强光场约束能够显著改变微纳光纤表面的光子态密度, 调控光纤表面发光原子等的自发辐射几

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB328703)、国家自然科学基金(批准号: 61475140)资助项目

率或量子状态^[11, 12]。

(2)强倏逝场。微纳光纤的超低表面粗糙度使其可以支持大比例(比如>90%)倏逝场的低损耗传输,有利于增强微纳光纤与其他结构的近场耦合,并提高微纳光纤传感器的灵敏度^[13-16]。同时,强约束的倏逝场能在微纳光纤表面形成大梯度的空间光场,产生较大的光学梯度力,用于操控冷原子^[11, 17, 18]或纳米颗粒^[19]。此外,在单模条件附近,微纳光纤芯内外能量比例随直径和波长变化剧烈,为大范围调控波导群速度、波导色散及光脉冲传输特性提供了可能^[20]。

(3)小质量。由于微纳光纤的质量很小(比如,直径200 nm、长度10 μm的微纳光纤约为10⁻¹⁵ kg,10 fN),传输光的动量(比如,10 μW的光在1秒钟产生的光压约为10 fN)变化就有可能引起光纤明显的机械状态变化(比如机械振动),可用于灵敏检测其中传输光子的动量变化,以及实现高效的光子和声子耦合或转换^[21, 22]。

2 微纳光纤的制备

对于微纳光波导而言,表面光滑度和几何结构的均匀度直接影响其传输损耗,因而其制备方法非常重要。相比于光刻、电子束刻蚀、化学生长及纳米压印等方法,利用火焰、激光或电加热拉伸玻璃光纤制得的微纳光纤的表面光滑度和结构均匀度在所有微纳波导中是最好的^[1-3, 5](比如,典型的石英玻璃微纳光纤的表面粗糙度低达0.2 nm量级),因而微纳光纤的传输损耗在所有同等直径或线宽的光波导中是最低的^[6],机械强度(比如抗张强度、弯曲性能等)也很高^[1, 23]。

除了从玻璃光纤直接拉制微纳光纤外,还可

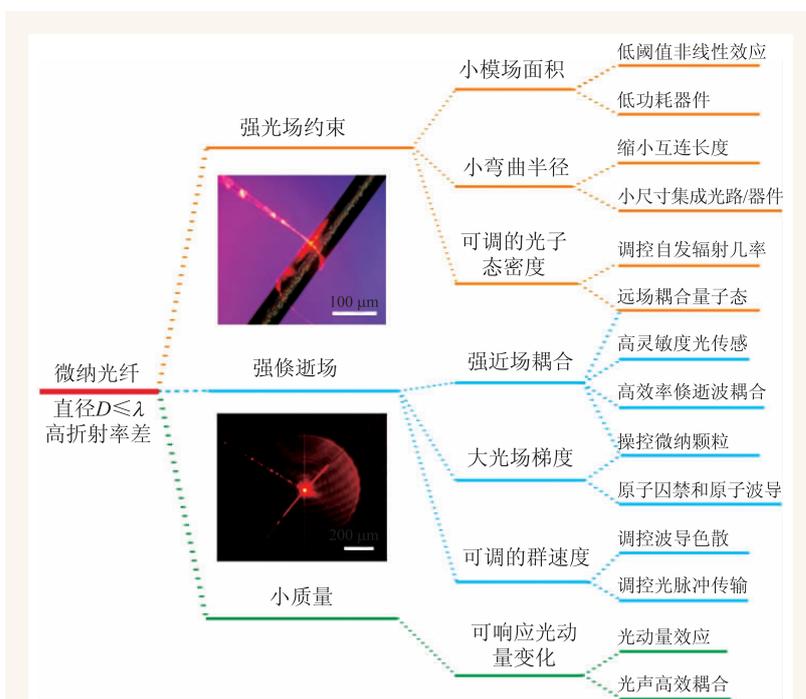


图1 微纳光纤的光学特性和应用^[5]

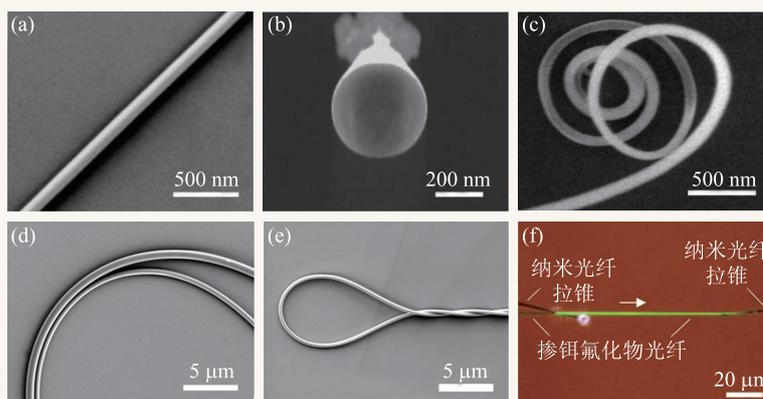


图2 典型微纳光纤的扫描电镜图(a)–(e)和光学显微镜图(f)(引自文献[5])

以从块状玻璃^[24]或聚合物溶液^[4, 25]或熔体中拉伸制备各种材料(如掺稀土离子的硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、碲化物玻璃、聚合物等)的微纳光纤(见图2)。

3 微纳光纤的导波特性和

3.1 传播常数与单模条件

由于微纳光纤芯内外折射率差较大,因此标准光纤的弱导近似条件不再适用,可以通过求解

Maxwell 方程的严格解结合数值计算得到传播常数(见图4), 从而获得微纳光纤的导波特性^[20]。不失一般性地, 可作如下假定: (1)光纤具有理想的圆形截面, 其折射率为阶跃分布, 包层为无限均匀介质; (2)光纤的直径(D)均匀, 表面粗糙度足够小, 其由表面粗糙引起的散射损耗可以忽略; (3)光纤的长度足够长, 保证传输光在光纤内能够建立稳定的模式。

基于上述假定, 麦克斯韦方程组可以写为

$$\begin{cases} (\nabla^2 + n^2 k^2 - \beta^2) \mathbf{e} = 0 \\ (\nabla^2 + n^2 k^2 - \beta^2) \mathbf{h} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中 n 为折射率, \mathbf{e} 为电场矢量, \mathbf{h} 为磁场矢量, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 是真空中光波长, β 是传播常数。

对于不同的模式, 得到的本征方程如下:

对 $HE_{m,m}$ 和 $EH_{m,m}$ 模式,

$$\left\{ \frac{J'_m(U)}{UJ'_m(U)} + \frac{K'_m(W)}{WK'_m(W)} \right\} \left\{ \frac{J'_m(U)}{UJ'_m(U)} + \frac{n_2^2 K'_m(W)}{n_1^2 WK'_m(W)} \right\} = \left(\frac{v\beta}{kn_1} \right)^2 \left(\frac{V}{UW} \right)^4, \quad (2)$$

对 TE_{0m} 模式,

$$\frac{J_1(U)}{UJ_0(U)} + \frac{K_1(W)}{WK_0(W)} = 0, \quad (3)$$

对 TM_{0m} 模式,

$$\frac{n_1^2 J_1(U)}{UJ_0(U)} + \frac{n_2^2 K_1(W)}{WK_0(W)} = 0. \quad (4)$$

其中 J_m 是第一类贝塞尔函数, K_m 为第二类修正贝塞尔函数, 导模在芯区中的横向传播常数 $U = a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2}$, 导模在包层中的横向传播常数 $W = a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}$, 归一化传播常数 $V = k_0 a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$, 以及光纤直径 $D = 2a$ 。

通过数值计算的方法, 对(2), (3), (4)式求解可以得到微纳光纤的传输常数 β 。几种典型直径(800nm, 400nm和200 nm)的微纳光纤传输633 nm波长的光时基模光场的空间能量分布(坡印亭矢量)如图3所示。对于直径较粗的微纳光纤(如 $D = 800$ nm), 其光场的能量主要被约束在光纤的芯层内; 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在临近光纤表面的外部空间传输。

3.2 微纳光纤的近场耦合

微纳光纤的近场耦合研究有着广泛的应用前景, 比如光纤耦合器件设计和研制, 光纤与外部系统的光学连接, 微纳光纤间的能量交换以及微纳光波导结构的高效输入输出等。通常, 弱导光纤(如标准单模光纤)的倏逝波耦合特性可以用微扰理论来描述, 然而, 对于芯内外高折射率差的微纳光纤组成的耦合结构, 利用微扰理论求解得到的结果往往会有明显的偏差, 因此可以使用更为精确的数值计算方法。基于三维时域有限差分(3D-FDTD)计算^[26], 图4给出了直径为350 nm的二氧化硅微纳光纤倏逝波耦合的能量分布图。从图中可以看出, 由于微纳光纤间的强耦合作用, 实现最大能量交换所需的最小耦合长度(约为 $2 \mu\text{m}$)远小于弱耦合波导间的耦合长度(通常大于 $10 \mu\text{m}$)。

3.3 弯曲损耗

弯曲波导是光耦合器、谐振

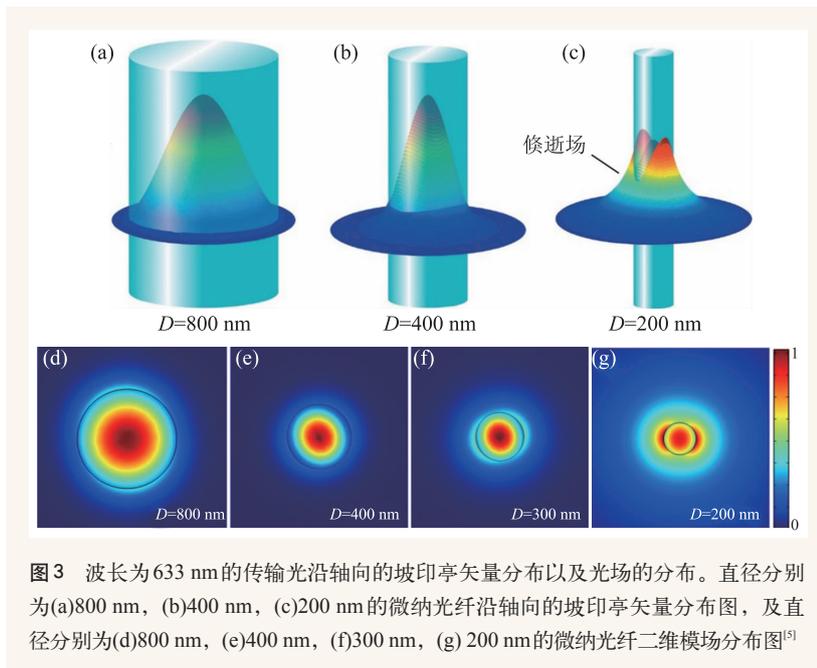


图3 波长为633 nm的传输光沿轴向的坡印亭矢量分布以及光场的分布。直径分别为(a)800 nm, (b)400 nm, (c)200 nm的微纳光纤沿轴向的坡印亭矢量分布图, 及直径分别为(d)800 nm, (e)400 nm, (f)300 nm, (g) 200 nm的微纳光纤二维模场分布图^[5]

腔、干涉器等功能光子器件及光集成芯片的基本结构之一。如前所述,相较于标准单模光纤,微纳光纤芯内芯外折射率差大,因而对光波的约束能力强,这也表现在当光波经过半径仅为微米量级的弯曲结构时,仍然能够维持很低的弯曲损耗^[10]。图5给出了二氧化硅微纳光纤(直径为450 nm)在弯曲半径分别为1 μm 和5 μm 时的电场强度分布计算结果。结果表明,在5 μm 的弯曲半径下,大部分光场可以很好地通过这个弯曲结构(见图5(a), (b)),其弯曲损耗仅为0.14 dB/90°。当弯曲半径减小至1 μm 时,弯曲部分开始出现明显的辐射损耗(见图5(c)),且伴随较显著的模场横向漂移(见图5(d)),此时弯曲损耗约为4.8 dB/90°。

4 微纳光纤光子器件

得益于其新颖的导波特性和近场光学耦合、光学传感、非线性光学、量子光学、微纳光源、表面等离子激元光子学和光机械学等领域得到了广泛而深入的研究,如图6所示^[3]。

4.1 导波及近场光学耦合应用

4.1.1 微纳光纤耦合器

基于微纳光纤尺寸小、倏逝场强的特点,通过其亚波长尺度的近场相互作用,可与半导体纳米线、金属纳米线、平面波导、衬底^[26, 27]等实现较高的耦合效率。2009年,Guo等人报道了一种复合型金属—介质纳米线耦合器^[27],将光纤拉锥与直径270 nm的ZnO纳米线及直径240 nm的Ag纳米线进行近场耦合,耦合长度为亚波长量级。当输入650 nm激光时,在ZnO纳米线和Ag纳米线的输出端均观察到了明显的红光,如图7所示。通过优化微

纳光纤直径和耦合长度,获得了高达82%的“光子—表面等离子激元”单偏振态耦合效率。

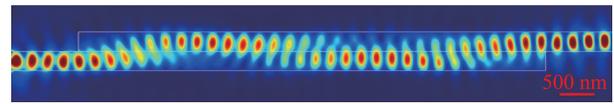


图4 两根直径均为350 nm的微纳光纤平行放置,利用倏逝场耦合,重叠长度为7.2 μm 。导光的波长为633 nm(引自文献[5])

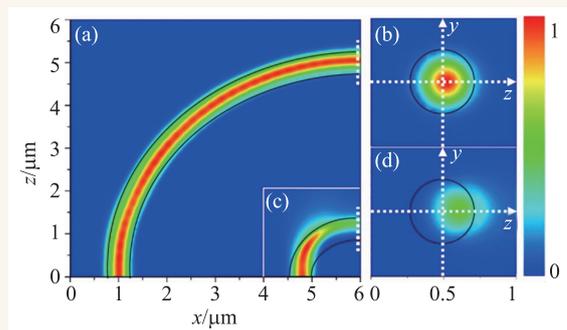


图5 弯曲半径为(a)5 μm 和(c)1 μm 时 x - z 平面(光纤沿轴向剖面)电场强度分布($y=0$)(输入为 x 方向偏振、波长为633 nm的准偏振光,微纳光纤直径为450 nm);(b)和(d)分别为(a)5 μm 和(c)1 μm 情况下的输出模场在 y - z 截面上的分布($x=6 \mu\text{m}$ 处)^[10]

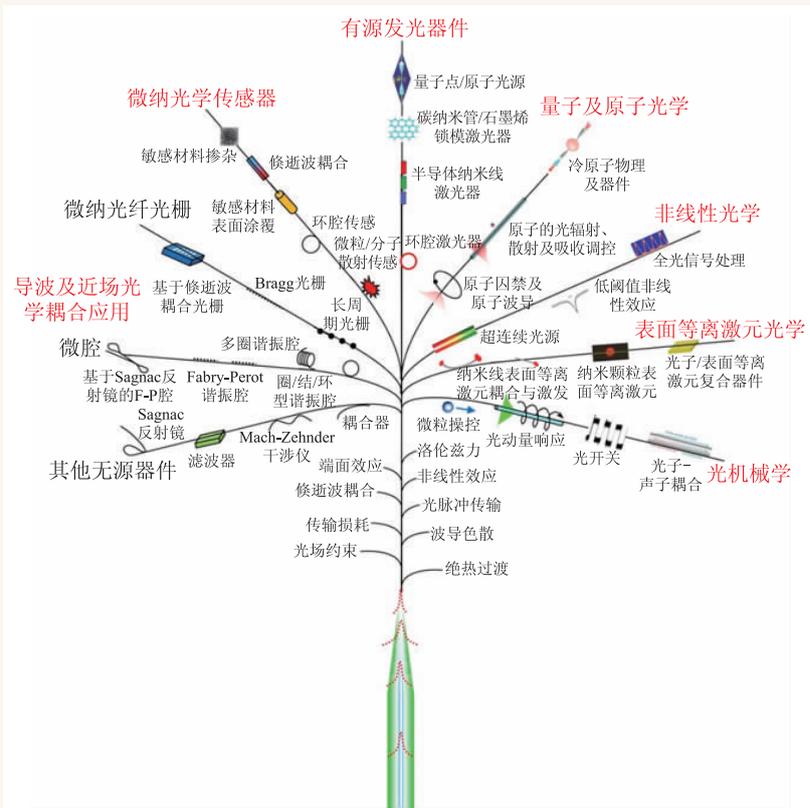


图6 微纳光纤应用举例^[3]

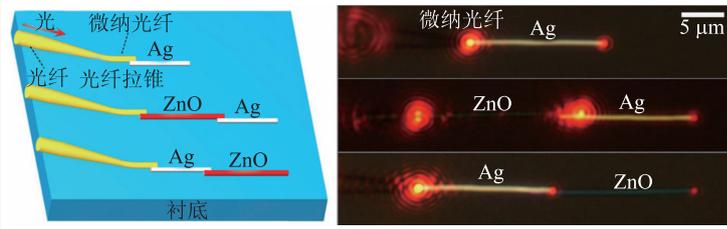


图7 微纳光纤—金属纳米线近场耦合结构及实验照片^[27]

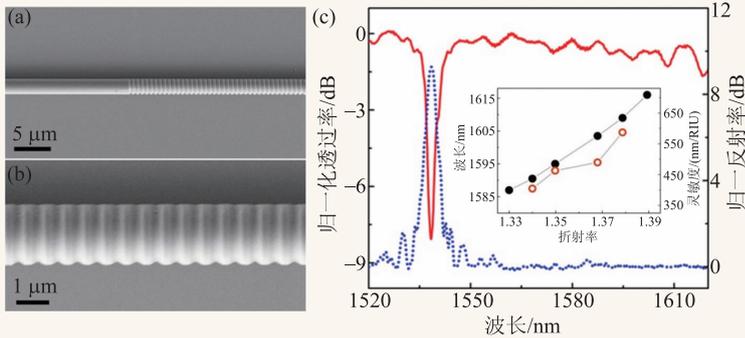


图8 微纳光纤布拉格光栅 (a)由1.8 μm直径的二氧化硅微纳光纤制成的布拉格光栅的扫描电镜图；(b)微纳光纤布拉格光栅的近摄图；(c)微纳光纤布拉格光栅的透射光谱和反射光谱^[36]

4.1.2 微纳光纤 Mach—Zehnder 干涉器

基于微纳光纤的 Mach—Zehnder 干涉器具有尺寸小、制备简单、灵活度高等优点，在光纤传感(如传感器)和光信息处理(如调制器和滤波器)等方面具有应用前景^[28—30]。2008年，Li 等人提出了一种基于碲化物玻璃微纳光纤耦合的 Mach—Zehnder 调制器，整体器件尺寸只有大约 100 μm，以宽带光源输入时，可以得到明显的调制光谱，调制深度可达 10 dB 左右^[28]。此外，其调制光谱还可以通过改变调制器两臂的光程差进行改变。

4.1.3 微纳光纤光栅

与标准光纤光栅类似，微纳光纤也可以通过沿轴向周期性地调制光纤纤芯的等效折射率而形成衍射光栅。微纳光纤光栅的制备方法包括 CO₂ 激光器刻蚀^[31]，准分子激光器刻蚀^[32, 33]，飞秒激光器刻蚀^[34]和聚焦离子束刻蚀^[35, 36]等。微纳光纤光栅包括布拉格(Bragg)光栅^[32, 33, 36, 37]和长周期光栅^[31, 38]。相比于传统的光纤光栅，其结构尺寸更小，灵敏度更高，抗张强度和耐冲击性能也更好。图 8 为 Liu 等人于 2011 年通过聚焦离子束刻蚀制备而成的微纳光

纤光栅^[36]，该微纳光纤直径为 1.8 μm，光栅长度和光栅周期分别为 518 μm 和 576 nm，刻蚀深度约为 100 nm。该光栅的透射和反射光谱测量结果如图 8(c)所示，其透射峰(或反射峰)深度达 8 dB，利用该光栅制成的传感器灵敏度高达 660 nm/RIU。

4.1.4 微纳光纤环形谐振腔

微纳光纤可以通过倏逝波耦合的方式制成谐振腔，典型的微环谐振腔结构大致可以分为圈型、结型、环型和多圈型四种。

(1)圈型谐振腔：通过将微纳光纤绕成一圈交叠而成(图 9(a), (b), (c))，交叠区的形状靠微纳光纤间的静电力、范德瓦尔斯力以及摩擦力维持。这种圈型谐振腔最早是由 Caspar 等人在 1989 年提出^[39]。他们将直径为 8.5 μm 的微光纤盘成 2 mm 的圈，

并测得其在 1500 nm 波长附近的 Q 值为 27000。此后 2005 年，Sumetsky 等人使用亚波长直径(约 0.66 μm)的微纳光纤将圈型谐振腔的尺寸缩小到 0.64 mm，且在 1500 nm 波长附近的 Q 值可达 95000^[40]。2012 年，Hu 等人提出将圈型谐振器的耦合区用熔融的聚合物纳米线粘合起来，以进一步增强其结构稳定性^[29]。

(2)结型谐振腔：将微纳光纤环绕一圈打结而成(图 9(d), (e), (f))，相比圈型结构更加稳定，而且结的半径也灵活可调。2003 年，Tong 等人用 950 nm 直径的微纳光纤制作出直径 150 μm 的结形谐振腔^[1]。2006 年，Jiang 等人使用直径 2 μm 左右的微纳光纤将结型谐振腔 Q 值达到 57000^[41]。此后，该类结型谐振腔被研究用于微纳光纤激光等方面^[42]。

(3)环型谐振腔：将微纳光纤首尾相接并将首尾交叠区熔接成一个独立的环而成(见图 9(g), (h), (i))。2008 年，Pal 等人提出，采用 CO₂ 激光熔接微纳光纤的技术，可使插入损耗低于 0.3 %^[43]，利用该技术所制备的环型微环谐振腔 Q 值达到

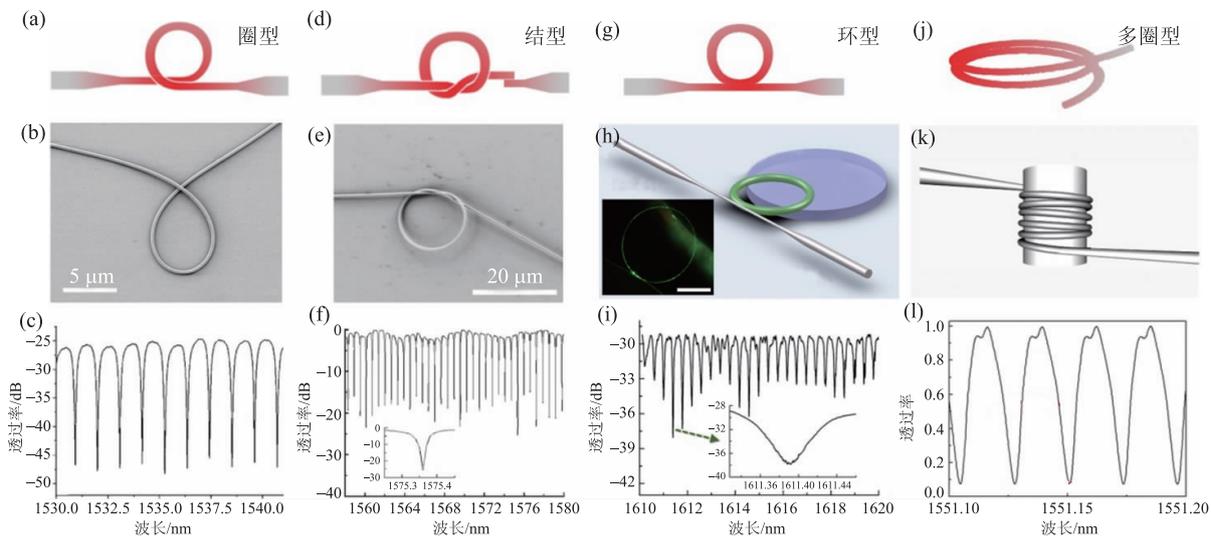


图9 微纳光纤谐振腔^[5]: 圈型((a), (b)), 结型((d), (e)), 环型((g), (h))和多圈型((j), (k))谐振腔结构示意图; (c), (f), (i)和(l)分别为4种结构在输入宽谱光时对应的谐振光谱

25000^[44]。2011年, Li等人通过改进的CO₂激光熔接微纳光纤技术, 将稀土掺杂磷酸盐微纳光纤熔接成有源环型谐振腔, 实现了微纳光纤环型激光器^[45]。

(4)多圈型谐振腔: 将微纳光纤在低折射率的介质棒上环绕多圈制得(图9(j), (k), (l))。这种结构最初是由Sumetsky在2004年提出^[46]并于2007年实验实现^[47]。利用耦合波方程可以从理论上分析并优化多圈型谐振腔的传输特性^[46]。2008年, Xu等人将微纳光纤绕制成空心管多圈型谐振腔, 并用其测量流过管道中的液体的折射率, 灵敏度可达40 nm/RIU^[48]。

4.2 微纳光纤激光器及量子光源

微纳光纤不仅可以用于无源谐振腔, 通过稀土离子掺杂或与有源材料耦合, 还可以用来制作微型光纤激光器。2006年, Jiang等人首次报道了稀土离子掺杂的微纳光纤结型激光器(图10(a))^[42]。他们从Er:Yb共掺的磷酸盐玻璃体块中拉制出直径为3.8 μm的微纳光纤, 通过微纳操作, 制成了直径为2 mm

的结型谐振腔结构, 在975 nm波长泵浦光激发下, 观察到1.55 μm波段的激光输出, 激光的阈值约为5 mW, 最大的输出功率为8 μW(图10(b), (c))。随后, Song等人报道了一种染料分子的聚合物微纳光纤结型激光器, 当用532 nm波长光泵浦时, 激光出射波长为625 nm, 线宽为0.07 nm^[49]。2011年, Li等人通过将掺稀土离子的磷酸盐玻璃微纳光纤熔接成一个直径为3.5 mm的闭环, 观察到0.05 nm线宽、1.5 μm波长的激光输出^[45]。

最近, 通过将碳纳米管或石墨烯沉积在微纳光纤表面作为饱和吸收波导, 掺铒光纤作为增益光纤, Martinez等人于2010年报道了超快脉冲的锁模光纤激光器, 其孤子脉宽可达~800 fs^[50]。2014年, Zhao等人采用在微纳光纤表面光学沉积

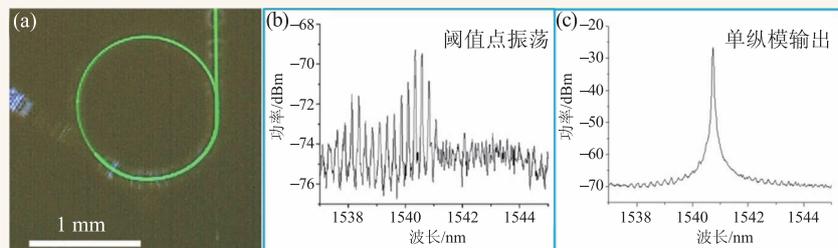


图10 微纳光纤激光器 (a)铒镱共掺的磷酸盐微纳光纤结型谐振腔在975 nm泵浦光下的光学显微照片, 绿色为其上转换荧光; (b)在阈值点附近的激光输出谱线; (c)远超出阈值的泵浦功率下的激光输出谱线^[42]

石墨烯的方法,在掺铒光纤环腔中,实现了双波长(1061.8 nm 和 1068.8 nm)的耗散孤子锁模激光器^[51]。

同时,微纳光纤在单光子源等量子光源方面的应用正在受到越来越多的关注。2011年, Masazumi 等人将 CdSe/ZnS 纳米晶体(量子点)涂覆在直径为 300 nm 的微纳光纤表面,纳米晶体发出的单光子有 7.4% 可耦合进微纳光纤。通过研究耦合效率与微纳光纤直径的关系,他们发现耦合效率随着光纤直径的减小呈指数性增长^[52]。2012年, Hakuta 等人将 CdSeTe(ZnS)量子点置于直径为 350 nm 的微纳光纤表面,使得量子点荧光(发光中心波长为 780 nm)耦合到微纳光纤导模的效率达到 22%^[53]。

4.3 微纳光纤传感器

微纳光纤不仅尺寸小,而且可以传输强约束的大比例倏逝场,在光学传感方面具有结构紧凑、响应速度快、灵敏度高、独特优势。如图 11(a), (b)所示,当被测样品与微纳光纤导模(通常为光纤外的倏逝波)相互作用时,将通过散射、吸收、色散、发光等改变传输光的特性,并在微纳光纤输出端测量输出光的强度、相位或光谱变化,就可以得知被测样品的相关信息。按照传感变量的不同,微纳光纤传感器大致可分为强度型

传感器(可对光强或光谱的改变进行检测)和相位型传感器(可对相位的改变进行检测)两类,现分别介绍如下:

4.3.1 强度型传感器

强度型传感器结构简单(一般只需单根微纳光纤),制备方便,在气体检测和液体检测中得到了广泛的应用。通过比较输出和输入光强的变化,测量外部环境的变化。2005年, Polynkin 等人研制成功一种测量微流通道中液体折射率变化的传感器^[14]。当 1500 nm 的探测光沿着微纳光纤传导时,泄漏到液体通道中光能量损耗与通道中液体的折射率相关,由此获得的折射率变化的检测极限为 5×10^{-4} 。同年, Villatoro 等人利用一种表面涂覆有金属钯层的微纳光纤,实现了对氢气浓度的快速检测^[15]。当微纳光纤暴露在氢气中时,其表面涂敷的钯因吸收氢气导致折射率变化,从而改变其对微纳光纤导模的散射和吸收强度。这种传感器体积小,响应速度快,对氢气的最低检测浓度可低至 0.05%。2008年, Gu 等人利用单根聚合物微纳光纤成功实现了对湿度的传感^[25]。如图 11(c)所示,在低折射率衬底(MgF₂)上,通过倏逝波耦合的方式,利用一根光纤拉锥将信号光输入到聚合物纳米线,并用另一根光纤拉锥进行耦合输出。在该结构下,可以通过选用不同功能的聚合物纳米线来实现对不同传感变量的检测,比如可以选用聚合物 PAM 制备的纳米线对湿度进行检测,利用 PAM 纳米线制作的湿度传感器具有可重复性好,响应时间短(RH 从 10% 到 75% 时响应时间约为 24 ms, RH 从 88% 到 75% 时响应时间约为 30 ms)等优点。此外,该结构(图 11(d))还可以通过使用掺有 PANI 的 PS 纳米线或者掺有 BTB 的 PMMA 纳米线,分别实现了对 NO₂ 或 NH₃ 的传感。2011年, Zhang 等人将微纳光纤(直径为 900 nm)与微流道(宽度为 125 μm)相结合,制备了一种液体环境中具有很好可重复性的生物传感器^[16]。通过在一端输入

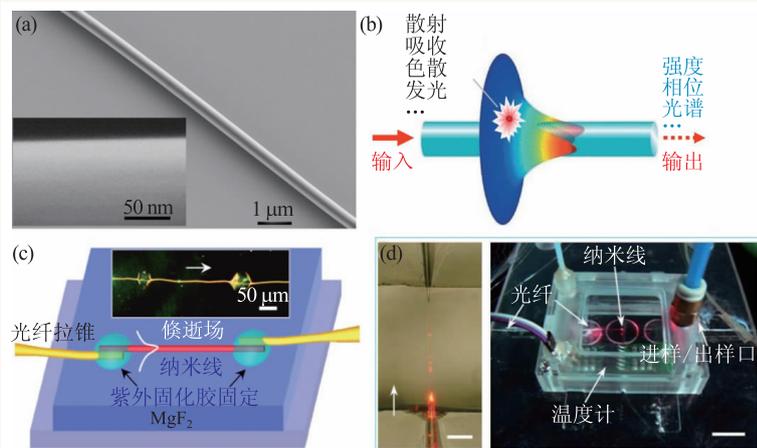


图 11 微纳光纤传感器 (a)功能化微纳光纤的扫描电镜图^[57]; (b)微纳光纤传感原理图; (c)微纳光纤传感器示意图^[58]; (d)微纳光纤传感器实物装置图^[58]

150 nW的宽带白光, 在另一段收集输出的光强, 可灵敏地检测到牛血清蛋白的吸收峰, 其最小探测限为 10 fg/ml。

4.3.2 相位型传感器

相位型传感则是对探测光的相位变化进行检测, 可以获得比强度型传感器更好的系统稳定性。2005年, Lou等人从理论上提出了一种基于Mach—Zehnder结构的微纳光纤传感, 其单位长度的灵敏度比一般的波导型传感器高一个量级以上^[13]。其中两根微纳光纤通过两个3 dB耦合器构成MZI, 当MZI的一臂通过倏逝场与环境发生作用时, 与另一臂(参考臂)的光束发生干涉, 从而得到待测介质的相关信息。2011年, Wu等人利用氧化硅/聚合物微纳光纤结形谐振腔结构, 实现了高灵敏度的湿度传感^[54]。在光纤表面没有湿度敏感材料的情况下, 在17%到95%的湿度范围内, 灵敏度可达~88 pm/10%-RH。2012年, Li等人报道了基于微纳光纤结形谐振腔和磁流体的全光纤磁场传感器, 可以探测到最小的强度为10 Oe的磁场^[55]。2013年, Muhammad等人利用非绝热的氧化硅微纳光纤实现了对位移(张力)和温度的测量^[56]。通过对谐振波长变化的测量, 其位移和温度的灵敏度分别可达4.2 pm/ μm 和12.1 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

4.4 微纳光纤在量子光学的应用

微纳光纤的强倏逝场被紧紧束缚在表面附近, 使得其在导光的条件下周围形成大的场梯度, 产生巨大的光学梯度力, 这可以被用来操控冷原子或纳米颗粒。微纳光纤目前在量子光学中的应用有以下3个方面:

4.4.1 原子囚禁

基于微纳光纤导光情况下产生的光学梯度力, 可以实现原子的囚禁^[12, 17, 18, 59]。2004年, Le Kien等人理论上证明了将蓝、红失谐的两束光同时导入微纳光纤, 利用两束光的倏逝场形成的光学势阱, 能够更好地实现原子的囚禁^[18]。2012年, Lacroûte等人利用两束相向传输的红、蓝失谐光, 在实验上实现了单个铯原子的囚禁, 基态原子的势阱深度可达-0.4 mK^[59]。

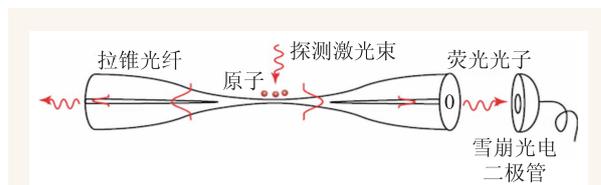


图12 原子荧光探测实验的示意图(原子荧光耦合到微纳光纤时, 由放置在光纤端的雪崩二极管进行收集)^[62]

4.4.2 原子光学特性的操控

基于微纳光纤囚禁原子的特殊结构, 原子的辐射、吸收与散射特性得到了很好的操纵与研究^[11, 60-62]。2005年, Kien等人从理论上证明了囚禁在微纳光纤倏逝场中的铯原子的自发辐射能够得到一定程度的增强, 自发辐射的光子耦合到微纳光纤的效率可达28%^[11]。2012年, Nayak等人微纳光纤束腰处利用磁光阱囚禁了一定量铯原子, 原子荧光以导模的形式耦合到微纳光纤, 在光纤两端进行收集(见图12), 在光谱上观察到了能谱的劈裂, 劈裂宽度随激发光强度增大而增大^[62]。

4.4.3 冷原子物理及器件

由于微纳光纤是一种可自由悬空的一维光波导, 可将其置于某些特殊环境中, 利用其优良的近场光学耦合与传输特性收集并传输信号, 在冷原子物理及应用研究方面具有应用潜力^[12, 62-65]。2011年, Russell等人微纳光纤束腰处利用磁光阱囚禁了铷原子云, 通过周期性改变磁场的空间分布, 使得囚禁的铷原子云空间分布呈周期性振动, 利用微纳光纤收集铷原子荧光, 成功测得了冷原子云的亚多普勒温度^[65]。2013年, Pittman等人将微纳光纤置于亚稳态氙原子气中, 实现高透过率的100 nW量级功率的饱和吸收^[66]。

4.5 微纳光纤在非线性光学的应用

微纳光纤不仅具有光场约束强、模场面积小、群速度色散可调等优势, 而且还能由高非线性材料拉制, 从而获得显著的非线性效应增强, 典型的应用包括以下两个方面:

4.5.1 超连续光源

基于微纳光纤的高非线性、光场强约束等特点, 可以研制低阈值、小尺寸、色散可调的超连

续光源。2004年, Leon-Saval 等人使用 532 nm 波长的纳秒激光脉冲作为激发光, 在直径为 510 nm、长度为 20 mm 的微纳光纤中产生超连续光谱, 所需平均功率仅为 $1.5 \text{ mW}^{[7]}$ 。2006年, Gattass 等人使用飞秒激光脉冲作为激发光源, 在直径为 700 nm、长度为 20 mm 的微纳光纤中产生超连续光谱, 所需阈值大约为 1 nJ 量级^[8]。此外, 采用高非线性材料拉制的微纳光纤也可以显著增强非线性效应^[67, 68]。2007年, Mägi 等人研究了具有亚波长直径($D=1.2 \mu\text{m}$)的 As_2Se_3 微纳光纤的非线性效应, 在 $1.5 \mu\text{m}$ 波长附近, 有效非线性系数的实验测量值约为 $68 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$, 是普通二氧化硅材料的 62000 倍(其中 125 倍来源于微纳光纤模场的强约束)^[68]。

4.5.2 倍频

由于微纳光纤中存在模式色散, 可以利用不同频率光的不同模式满足相位匹配条件, 实现三倍频的高效产生。2007年, Grubsky 等人在直径为 $0.5 \mu\text{m}$, 长度为 $100 \mu\text{m}$ 的二氧化硅微纳光纤中, 输入 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的纳秒光脉冲, 产生了 355 nm 的三倍频光, 转化效率约为 2×10^{-6} ^[69]。2012年, Ismaeel 等人研究了微纳光纤圈型谐振腔的三阶非线性效应, 微纳光纤直径为 $0.76 \mu\text{m}$, 恰能满足模间相位匹配条件, 圈型谐振腔能使环腔内的泵浦光显著增强, 当输入峰值功率为 100 W 的脉冲光 ($1.55 \mu\text{m}$, 4 ns) 时, 可获得 $0.5 \mu\text{m}$ 附近的三倍频光, 其转换效率约为 3×10^{-6} ^[70]。

值得一提的是, 虽然一般非极化玻璃材料的二倍频效应很弱, 但是微纳光纤由于直径很小, 长波长的基模与短波长的高阶模有可能具有相同或相近的等效折射率, 因此, 基于表面对称性破坏及准相位匹配有可能产生明显的二倍频信号。2010年, Richard 从理论上研究了微纳光纤中二倍频光的高阶模与基频光的基模的相位匹配问题,

指出微纳光纤中二倍频产生的带宽可以扩展到数十纳米^[71]。2013年, Brambilla 等在实验上观察到 700 nm 直径的氧化硅微纳光纤中的二倍频光^[72], 当使用 $1.55 \mu\text{m}$ 波长、5 ns 脉宽、90 W 峰值功率的基频激发光时, 获得的二倍频转换效率为 4.2×10^{-8} , 进一步将微纳光纤绕成圈型谐振腔时, 二倍频转换效率提高了 5.7 倍。

最近, 基于“石墨烯—微纳光纤”复合结构的饱和吸收等非线性效应引起了较多关注, 并已经在锁模光纤激光^[51, 73-75]、超快全光调制^[76-78]等方面显示了应用前景。

4.6 其他方面的应用

除了上述应用之外, 近年来, 微纳光纤还在表面等离子激元光学、光机械学^[3, 5]等方面获得了较多的关注和研究, 限于篇幅, 不再详述。

5 结束语与展望

迄今为止, 国内外对微纳光纤及其技术应用已经开展了大量研究, 取得了系列进展。从制备角度来看, 材料复合(比如掺杂、表面耦合)及结构调控(比如表面或内部微纳加工)是实现微纳光纤功能化的最有效途径。同时, 基于微纳光纤的导波特性和近场耦合、倏逝波调制、非线性光学、量子光学及光声相互作用等效应, 深入研究微纳光纤在光的产生、传输、调控、转换及测量等方面的应用, 将是未来的重要发展趋势之一。

致谢 感谢浙江大学光电信息工程学系石章兴、陈可人、王利镇、鲍庆洋同学为本文写作提供的帮助。

参考文献

- [1] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B *et al.* Nature, 2003, 426: 816
- [2] Brambilla G, Xu F, Horak P *et al.* Adv. Opt. Photonics, 2009, 1: 107
- [3] Tong L M, Zi F, Guo X *et al.* Opt. Commun., 2012, 285: 4641
- [4] Wang P, Wang Y P, Tong L M. Light: Sci. Appl., 2013, 2: e102
- [5] Wu X Q, Tong L M. Nanophotonics, 2013, 2: 407
- [6] Guo X, Ying Y, Tong L. Acc. Chem. Res., 2014, 47: 656
- [7] Leon-Saval S, Birks T, Wadsworth W *et al.* Opt. Express, 2004, 12: 2864
- [8] Gattass R R, Svacha G T, Tong L M *et al.* Opt. Express, 2006, 14: 9408

- [9] Foster M A, Turner A C, Lipson M *et al.* Opt. Express, 2008, 16: 1300
- [10] Yu H K, Wang S S, Fu J *et al.* Appl. Opt., 2009, 48: 4365
- [11] Le Kien F, Gupta S D, Balykin V I *et al.* Phys. Rev. A, 2005, 72: 032509
- [12] Sagué G, Vetsch E, Alt W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 163602
- [13] Lou J Y, Tong L M, Ye Z Z. Opt. Express, 2005, 13: 2135
- [14] Polynkin P, Polynkin A, Peyghambarian N *et al.* Opt. Lett., 2005, 30: 1273
- [15] Villatoro J, Monzón-Hernández D. Opt. Express, 2005, 13: 5087
- [16] Zhang L, Wang P, Xiao Y *et al.* Lab Chip, 2011, 11: 3720
- [17] Balykin V I, Hakuta K, Le Kien F *et al.* Phys. Rev. A, 2004, 70: 011401
- [18] Le Kien F, Balykin V I, Hakuta K. Phys. Rev. A, 2004, 70: 063403
- [19] Brambilla G, Senthil Murugan G, Wilkinson J S *et al.* Opt. Lett., 2007, 32: 3041
- [20] Tong L M, Lou J Y, Mazur E. Opt. Express, 2004, 12: 1025
- [21] She W L, Yu J H, Feng R H. Phys. Rev. Lett., 2008, 101: 243601
- [22] Beugnot J C, Lebrun S, Pauliat G *et al.* Nat. Commun., 2014, 5: 5242
- [23] Brambilla G, Payne D N. Nano Lett., 2009, 9: 831
- [24] Tong L M, Hu L L, Zhang J J *et al.* Opt. Express, 2006, 14: 82
- [25] Gu F X, Zhang L, Yin X F *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 2757
- [26] Huang K J, Yang S Y, Tong L M. Appl. Opt., 2007, 46: 1429
- [27] Guo X, Qiu M, Bao J M *et al.* Nano Lett., 2009, 9: 4515
- [28] Li Y H, Tong L M. Opt. Lett., 2008, 33: 303
- [29] Hu Z F, Li W, Ma Y G *et al.* Opt. Lett., 2012, 37: 4383
- [30] Li X Y, Li W, Guo X *et al.* Opt. Express, 2013, 21: 15698
- [31] Xuan H F, Jin W, Zhang M. Opt. Express, 2009, 17: 21882
- [32] Zhang Y, Lin B, Tjin S C *et al.* Opt. Express, 2010, 18: 26345
- [33] Ran Y, Tan Y N, Sun L P *et al.* Opt. Express, 2011, 19: 18577
- [34] Fang X, Liao C R, Wang D N. Opt. Lett., 2010, 35: 1007
- [35] Ding M, Wang P F, Lee T *et al.* Appl. Phys. Lett., 2011, 99: 051105
- [36] Liu Y X, Meng C, Zhang A P *et al.* Opt. Lett., 2011, 36: 3115
- [37] Liang W, Huang Y Y, Xu Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 151122
- [38] Xuan H F, Jin W, Liu S J. Opt. Lett., 2010, 35: 85
- [39] Caspar C, Bachus E J. Electron. Lett., 1989, 25: 1506
- [40] Sumetsky M, Dulashko Y, Fini J M *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86: 161108
- [41] Jiang X S, Tong L M, Vienne G *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 223501
- [42] Jiang X S, Yang Q, Vienne G *et al.* Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 143513
- [43] Pal P, Knox W H. Opt. Express, 2008, 16: 11568
- [44] Pal P, Knox W H. IEEE Photonics Technol. Lett., 2009, 21: 766
- [45] Li W, Wang P, Hu Z F *et al.* IEEE Photonics Technol. Lett., 2011, 23: 831
- [46] Sumetsky M. Opt. Express, 2004, 12: 2303
- [47] Sumetsky M, Dulashko Y, Fishteyn M. National Fiber Optic Engineers Conference, 2007
- [48] Xu F, Brambilla G. Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 101126
- [49] Song Q H, Liu L Y, Xu L. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27: 4374
- [50] Martinez A, Fuse K, Xu B *et al.* Opt. Express, 2010, 18: 23054
- [51] Zhao N, Liu M, Liu H *et al.* Opt. Express, 2014, 22: 10906
- [52] Fujiwara M, Toubaru K, Noda T *et al.* Nano Lett., 2011, 11: 4362
- [53] Yalla R, Le Kien F, Morinaga M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 109: 063602
- [54] Wu Y, Zhang T H, Rao Y J *et al.* Sens. Actuators, B, 2011, 155: 258
- [55] Li X L, Ding H. Opt. Lett., 2012, 37: 5187
- [56] Muhammad M Z, Jasim A A, Ahmad H *et al.* Sens. Actuators, A, 2013, 192: 130
- [57] Gu F X, Yu H K, Wang P *et al.* ACS nano, 2010, 4: 5332
- [58] Gu F, Zhang L, Yin X *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 2757
- [59] Lacroûte C, Choi K S, Goban A *et al.* New J. Phys., 2012, 14: 023056
- [60] Le Kien F, Balykin V I, Hakuta K. Phys. Rev. A, 2006, 73: 013819
- [61] Minogin V G, Chormaic S N. Laser Phys., 2010, 20: 32
- [62] Nayak K P, Hakuta K. New J. Phys., 2008, 10: 053003
- [63] Le Kien F, Gupta S D, Nayak K P *et al.* Phys. Rev. A, 2005, 72: 063815
- [64] Vetsch E, Reitz D, Sagué G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 203603
- [65] Russell L, Deasy K, Daly M J *et al.* Meas. Sci. Technol., 2012, 23: 015201
- [66] Pittman T B, Jones D E, Franson J D. Phys. Rev. A, 2013, 88: 053804
- [67] Brambilla G, Koizumi F, Feng X *et al.* Electron. Lett., 2005, 41: 400
- [68] Mägi E C, Fu L B, Nguyen H C *et al.* Opt. Express, 2007, 15: 10324
- [69] Grubsky V, Feinberg J. Opt. Commun., 2007, 274: 447
- [70] Ismaael R, Lee T, Ding M *et al.* Opt. Lett., 2012, 37: 5121
- [71] Richard S. J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys., 2010, 27: 1504
- [72] Gouveia M A, Lee T, Ismaael R *et al.* Appl. Phys. Lett., 2013, 102: 201120
- [73] He X, Liu Z B, Wang D N. Opt. Letters, 2012, 37: 2394
- [74] Sheng Q, Feng M, Xin W *et al.* Opt. Express, 2013, 21: 14859
- [75] Xin W, Liu Z B, Sheng Q W *et al.* Opt. Express, 2014, 22: 10239
- [76] Liu Z B, Feng M, Jiang W S *et al.* Laser Phys. Lett., 2013, 10: 065901
- [77] Yao B, Wu Y, Wang Z *et al.* Opt. Express, 2013, 21: 29818
- [78] Li W, Chen B, Meng C *et al.* Nano Lett., 2014, 14: 955