

基于聚合物纳米光纤的微光子学器件及其应用

邢晓波¹ 蔡继业¹ 王宇清² 朱恒² 何文²

(¹暨南大学化学系, 广东 广州 510632; ²中山大学光电材料与技術国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要 聚合物纳米光纤具有很好的器件构筑能力和良好的导光性能,对构筑超紧凑的微光子学器件和小型化集成光路十分理想。介绍了一种利用一步控制技术制作的、具有良好的机械性能和光学性能的聚合物纳米光纤——聚对苯二甲酸丙二醇酯(PTT)纳米光纤。作为亚波长波导, PTT 纳米光纤具有较大的倏逝场和强约束。详细介绍了利用 PTT 纳米光纤组装的微光子学结构和器件(例如:弯曲结构、环形结构、 $M \times N$ 耦合分束器、马赫-曾德尔干涉仪)。组装的结构和器件具有体积紧凑、损耗小的优点。概述了聚合物纳米光纤和器件的特点及其应用前景。

关键词 光电子学; 聚合物纳米光纤; 聚对苯二甲酸丙二醇酯; 微光子学器件; 小型化集成光路

中图分类号 TN41

OCIS 060.2280 060.2340 130.3990 130.5460

文献标识码 A

Polymer Nanofiber Based Microphotonic Devices and Applications

Xing Xiaobo¹ Cai Jiye¹ Wang Yuqing² Zhu Heng² He Wen²

¹Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China
²State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China

Abstract Polymer nanofibers have highly configurable ability and good guiding properties, which is desirable for ultracompact microphotonic devices and miniaturized photonic integrated circuits. A polymer nanofiber-poly(trimethylene terephthalate) (PTT) nanofiber with good mechanical and optical properties is introduced, which is fabricated by one-step drawing process. As a subwavelength waveguide, polymer nanofiber has tight-confinement ability and large evanescent optical field. A varies of PTT nanofibers-based ultracompact structures and devices (such as bends, rings, $M \times N$ optical coupling splitters, and Mach-Zehnder interferometers) are described in detail. These structures and devices have advantages of compact structure and low loss. Finally, the properties and application prospects of the polymer nanofibers and nanofiber devices are summarized.

Key words optoelectronics; polymer nanofiber; poly(trimethylene terephthalate); microphotonic device; miniaturized photonic integrated circuits

1 引言

注入、传导和控制光信号在亚波长或纳米量级的体积中传输对于实现超紧凑的微光子学器件及最小化的集成光路是十分重要的,这代表着集成光学向集成纳米光子学迈进了一大步^[1~5]。目前,自上而下的光刻技术是实现光子学集成的主要方法。一系列纳米量级的基于表面等离子体波导^[1]、光子线波导^[4,6]和光子晶体波导^[3]的光子芯片已经被制作出来。但是自上而下的方法通常结合了光刻、刻蚀和沉积等技术,制作工艺比较复杂,成本昂贵。最近,研究者尝试着利用半导体纳米线和纳米光纤来组装光子学器件和结构^[2,7~9]。但是,由于半导体纳米线和纳米光纤相对小的弹性和柔韧性,使得器件的组装受到了较大限制。与半导体纳

收稿日期: 2010-03-29; **收到修改稿日期:** 2010-05-26

基金项目: 第 45 批中国博士后科学基金一等资助金(20090450099)和国家自然科学基金(60625404,60577001)资助课题。

作者简介: 邢晓波(1977—),女,博士,博士后,主要从事微纳光电子器件及集成、微纳光学传感等方面的研究。

E-mail: xingxiaobo2002@sina.com

导师简介: 蔡继业(1944—),男,博士,教授,主要从事生物纳米光子学方面的研究。

E-mail: tjycail@jnu.edu.cn(通信联系人)

米线和纳米光纤相比,聚合物纳米光纤具有良好的机械性能,尤其是弹性和柔韧性非常好,这对于组装超紧凑的、结构复杂的器件和功能模块是十分有利的^[10,11]。作为一种性能优良的聚合物材料,聚对苯二甲酸丙二醇酯(PTT)拥有优良的回弹性、柔韧性和较高的机械强度,以及较低的晶体模量(2.59 GPa)。PTT 纤维表现出优良的弹性和柔韧性,其弹性恢复率大于 90%^[12~16]。从可见到近红外波段,非晶态 PTT 薄膜的透过率在 90%左右;PTT 的折射率较大为 1.638,可以提供良好的光限制^[17,18]。因此,PTT 将是一种十分有前途的微纳光纤材料,PTT 纤维也是构筑超紧凑光子学器件的最佳选择之一。聚合物纳米光纤具有较大的倏逝场、强约束及低损耗的优点;尤其是具有良好的结构构筑能力。本文介绍了 PTT 纳米光纤及其微光子学器件^[18~25],并对其应用前景进行了分析和概述。

2 聚合物纳米光纤的制备

针对现有聚合物纳米光纤制作技术的局限性,邢晓波等^[18,19]提出了一种简单、快速、成本低廉的聚合物纳米光纤的制作方法——一步拉制法。如图 1 所示,利用一步拉制技术来制作 PTT 纳米光纤。首先,用一块加热板来熔化 PTT 粒料,拉制的过程中保持加热板表面的温度为 $(250\pm 10)^\circ\text{C}$ ^[15];然后,将一条直径大约为 125 μm 的 SiO₂ 或铁棒的末端靠近并且浸入熔融的 PTT 中;其次, SiO₂ 或铁棒以 0.1~1 m/s 的速度垂直上提,在熔融态 PTT 和棒的末端之间形成延伸的 PTT 纤维;最后,延伸的 PTT 纤维在空气中迅速淬火,形成一条空气包裹的非晶态 PTT 纳米光纤。我们得到的纳米光纤的直径最小为 60 nm,长度可达 50 cm。

扫描电子显微镜(SEM)和高分辨率透射电子显微镜(TEM)用于表征 PTT 纳米光纤的形貌。在光学显微镜下,我们可以十分精确地切割、放置、弯曲、扭曲和拉伸 PTT 纳米光纤,形成各种各样的结构。为了展示制作的聚合物纳米光纤的长度,将一条长度为 25 cm 的 PTT 纳米光纤尽可能多地缠绕在一条直径为 12 μm 的弯曲 PTT 棒上,形成一个纳米鸟巢,如图 2(a)所示。

为了研究 PTT 纳米光纤的机械性能,在光学显微镜下面,对 PTT 纳米光纤进行放置、切割、弯曲和缠

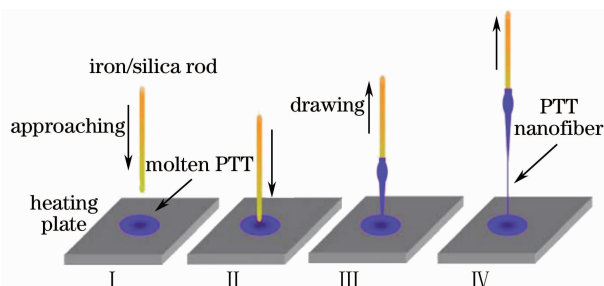


图 1 利用一步拉制方法制备 PTT 纳米光纤的示意图
Fig. 1 Schematic illustration of PTT nanofibers fabrication by one-step drawing process

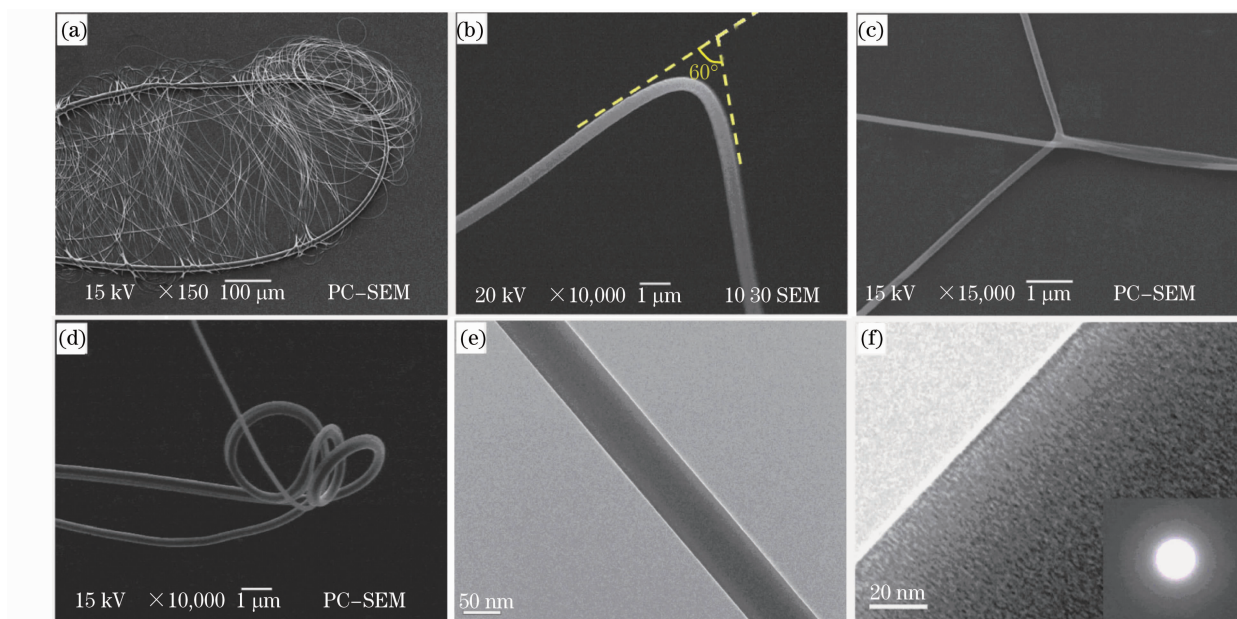


图 2 PTT 纳米光纤和纳米光纤结构的电子显微镜图像。(a)~(d)SEM 图像,(e),(f)TEM 图像

Fig. 2 Electron micrographs of PTT nanofibers and nanofiber structures. (a)~(d) SEM images, (e), (f) TEM images

绕,通过反复的操作来构筑想要的结构。PTT 纳米光纤可从 0° 到 180° 被任意地弯曲。举例说明,将一条直径为 480 nm 的 PTT 光纤弯曲成 60° 角,如图 2(b)所示。图 2(c)给出了两条直径分别为 140 nm 和 170 nm 的 PTT 纳米光纤通过弹性连接成星形结构。图 2(d)进一步给出了两条直径分别为 280 nm 和 160 nm 的 PTT 纳米光纤形成的弹性螺旋结构。图 2(e)和(f)分别给出了直径为 70 nm 和 180 nm 的 PTT 纳米光纤的 TEM 图像。由上述图像可以看出,我们制作的 PTT 纳米光纤表面十分光滑,没有可见的缺陷和不规则。通过测量得知,PTT 纳米光纤的平均典型侧壁粗糙度的均方根为 0.28 nm。图 2(f)的插图给出了 PTT 纳米光纤的电子衍射图,证明了获得的 PTT 纳米光纤是非晶态的^[19]。

3 聚合物光纤的光学特性

文献[26]中给出了纳米光纤光场的解,由于计算过程进行了弱导近似,得到的误差相对较大。本论文采用完美匹配层(PML)边界条件^[27]和 FD-BPM 相结合的数值算法^[28~30],分析了 PTT 微纳光纤的模场分布和传输特性^[20]。假设空气的折射率为 1.0,PTT 材料的折射率为 1.638。通过 FD-BPM 数值模拟,当工作波长为 650 nm 时,直径为 300 nm 的 PTT 纳米光纤的基模(HE_{11})场分布如图 3(a)所示。通过计算得出,纤芯内限制的光功率为 46.9%,大约有 86.5%的光功率限制在以纤芯为原点、直径为 540 nm 的小区域内。对于基模,图 3(b)给出了纤芯内限制的光功率百分比随着光纤直径的变化关系。我们发现,当工作波长为 473,532 和 650 nm 时,纤芯内的功率百分比随着直径的增大而增加。开始时,纤芯内的限制功率随着直径的增大快速增加;当限制功率达到 90%以后,随着直径的增大缓慢增加;最后接近 100%。同时也发现纤芯内限制的光功率与工作波长有关。对于同一直径的纳米光纤,工作波长越大,在纤芯内限制的功率越小。

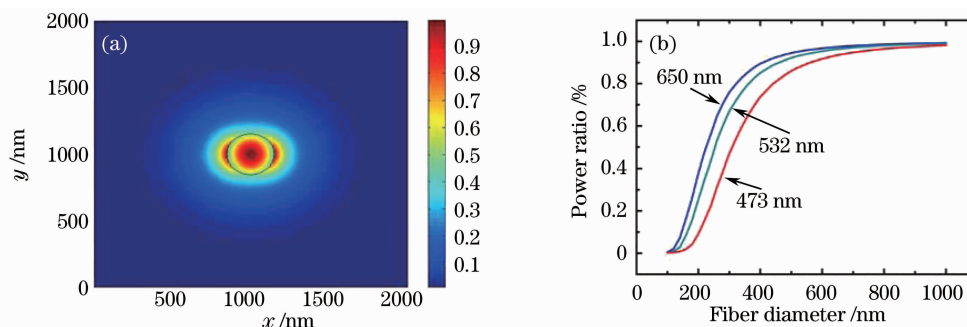


图 3 (a)工作波长为 650 nm 时,直径为 300 nm 的 PTT 纳米光纤的基模的模场分布,(b)对于 PTT 纳米光纤基模,纤芯内限制的功率比值随着直径的变化关系

Fig. 3 (a) Fundamental mode distribution of 300 nm diameter PTT nanofiber at 650 nm wavelength, (b) fractional power of fundamental mode inside the core of PTT fiber versus fiber diameter at 473, 532, and 650 nm wavelength

由于 PTT 纳米光纤具有较大的倏逝场,研究 PTT 纳米光纤和 SiO_2 纳米尖锥之间的耦合问题是很有意义的。何文等^[21]研究了倏逝波耦合中, SiO_2 纳米尖锥和 PTT 纳米光纤之间的交叉角和工作波长对耦合效率的影响。在光学显微镜下,首先用微操纵仪将直径为 640 nm 的 PTT 纳米光纤用两个微支架固定,然后放置在可旋转的圆盘上面。然后,利用直接拉制法制作直径为 800 nm 的 SiO_2 纳米尖锥,作为耦合波导来输入光信号。如图 4(a)所示,将通有绿色激光(波长为 532 nm)的 SiO_2 纳米尖锥(末端直径为 800 nm)通过 5-D 调节架放置在直径为 640 nm 的 PTT 纳米光纤上,通过调节两者的耦合长度使得 PTT 纳米光纤末端的输出功率最大。在实验中,通过旋转圆盘来调节 Silica 纳米尖锥和 PTT 纳米光纤之间的交叉角,交叉角从 90° 到 0° 变化,每隔 5° 改变一次。研究发现,当 SiO_2 纳米尖锥和 PTT 纳米光纤互相垂直时,没有光信号耦合进入 PTT 纳米光纤,只是在两者的交叉处和 SiO_2 纳米尖锥的末端各有一个明显的散射光斑,其中 SiO_2 纳米尖锥末端的散射斑是来自激光的发射。随着交叉角的减小,测量的 PTT 纳米光纤末端的输出功率逐渐增加, SiO_2 纳米尖锥末端的光斑逐渐变暗,两者交叉处的的散射光斑逐渐减小。当蓝光(532 nm)、红光(650 nm)、和近红外(1310 和 1550 nm)耦合进入 SiO_2 时,也会观察到类似的现象。图 4(b)给出了对于不同工作波长的光信号(473,532,650,1310 和 1550 nm),测量的耦合效率随着交叉角的变化关系。我们发现,耦合效率随着交叉角(θ)的减小而增加。这是因为 SiO_2 纳米尖锥和 PTT 纳米光纤之间的光场的重叠面积

随着交叉角的减小而增加的缘故。同时也发现,工作波长越长,耦合效率越大。

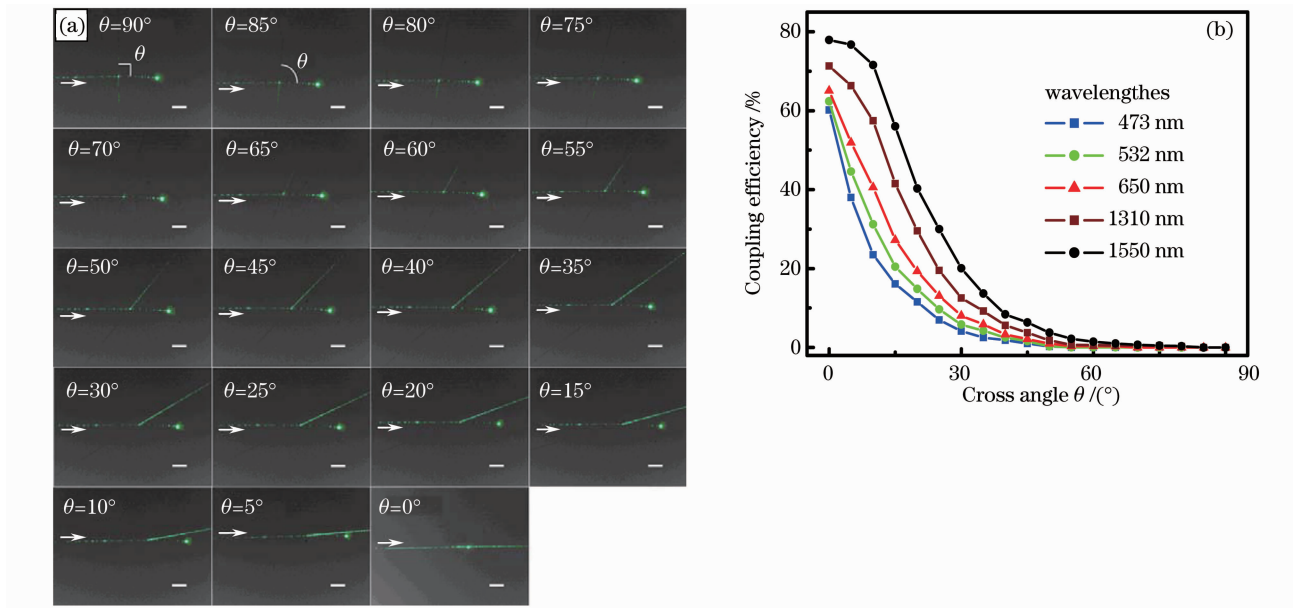


图4 (a)800 nm的SiO₂纳米尖锥和直径为640 nm的PTT纳米光纤之间形成不同交叉角的倏逝波耦合的光学显微镜图像,(b)对于不同的波长,耦合效率随 θ 的变化关系

Fig. 4 (a) Optical microscopy images of evanescent coupling between an 800 nm diameter silica taper and a 640 nm diameter PTT nanofiber at different cross angles (θ), (b) measured coupling efficiency versus θ at different wavelengths

邢晓波等^[19]测量了PTT纳米光纤的损耗;对同一工作波长,PTT微纳光纤的损耗随直径的增加而减小。PTT纳米光纤的损耗随时间的变化关系,大约为0.4 dB/d。由于PTT材料具有强抗污染的能力,所以PTT纳米光纤的衰减远小于SiO₂纳米光纤(大约1 dB/h)。

4 器件的组装及应用

由于PTT纳米光纤具有良好的结构构筑能力,加上高的耦合效率和低的损耗,我们利用PTT纳米光纤组装了一些结构紧凑的微光子学器件。

4.1 $M \times N$ 聚合物纳米光波导耦合分束器

由于半导体纳米光纤和纳米线具有相对小的弹性和柔韧性,器件的组装被限制了,只有简单的2个输入和输出的 2×2 分束器被组装出来^[8]。邢晓波等^[18]提出了一种聚合物纳米光波导耦合分束器的组装方法。利用显微操作缠绕技术,采用PTT纳米光纤组装了一系列结构超紧凑的、具有多个输入和输出的 $M \times N$ 聚合物纳米光波导耦合分束器。在光学显微镜下,首先将四条聚合物纳米光纤平行地放置在一个水平面上;然后将多条聚合物纳米光纤的两端固定;最后将平行的聚合物纳米光纤阵列绕中心纵轴旋转,形成 $M \times N$ 聚合物纳米光波导耦合分束器。通过调节平行纳米光纤之间的间距,可以得到不同的输入和输出分光角;同时可以通过缠绕的次数来调节中间耦合区域的长度。

利用倏逝波耦合的方法将光信号耦合进器件,将红光从端口A和B同时耦合进入一个 4×4 聚合物纳米光纤耦合分束器来测试其分光性能,其中从分支A到分支D的PTT纳米光纤的直径分别为450,450,510和570 nm,如图5(a)所示。当波长为650 nm的红光同时被耦合进入分支A和B时,经过耦合区域被分成4部分从分支1到4输出,其分光比大约为29:18:29:24。测量的器件的附加损耗为0.73 dB,包含0.48 dB的耦合损耗、0.02 dB的传输损耗和0.23 dB的散射损耗。这里器件的本征损耗为0.25 dB。从图5(a)插图的SEM图像可以看出,器件是由一个 3×4 和 1×4 光耦合分束器级联而成的,耦合区域的总宽度为1.98 μm 。该器件耦合区域的最大长度约为16.1 μm ,其中 1×4 分束器的耦合区域的长度约为8.5 μm 。 4×4 PTT纳米光纤耦合分束器的尺寸远小于报道的 4×4 空气包裹的多孔光纤耦合器(耦合区域宽10 μm ,长19.45 mm)^[31]和聚合物包裹的玻璃芯层的光纤分束器^[32](耦合区域宽140 μm ,长20 mm)。这

两种器件都是利用熔融拉锥技术制作的。图 5(b)进一步给出了一个耦合部分较长的 8×8 PTT 纳米光纤耦合分束器,是由 8 条直径分别为 400,400,400,400,400,750,750 和 600 nm(分支 A~H)的 PTT 纳米光纤组装而成的。当波长为 473 nm 的蓝光被耦合进分支 G 时,通过耦合部分被分到分支 1~8 输出。如图 5(b)插图的 SEM 图像所示,耦合部分的长度和宽度大约为 $38 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 。我们组装的 8×8 光耦合分束器的尺寸远小于利用 2×2 MMI 耦合器级联形成的 1×8 分束器 ($350 \mu\text{m} \times 13200 \mu\text{m}$)^[33],长度也可以与 InP-InGaAsP 材料的 1×8 分束器 ($583 \mu\text{m}$ 长)^[34] 相比较。

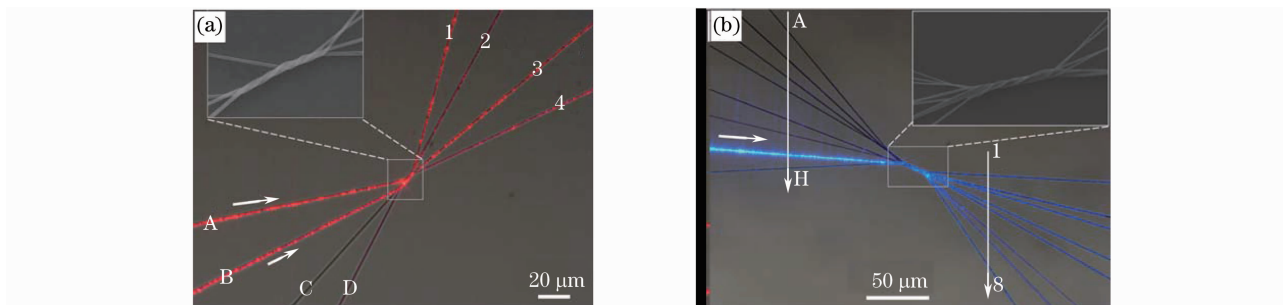


图 5 (a)红光从分支 A 和 B 同时输入一个 4×4 PTT 纳米光纤耦合光分束器,
(b)蓝光从端口 G 输入一个 8×8 耦合型分束器

Fig. 5 (a) Two red lights are simultaneously launched into the branches A and B of a 4×4 PTT nanofiber photonic coupling splitter, (b) blue light is launched into the branch G of an 8×8 PTT nanofiber photonic coupling splitter

4.2 折射率传感器

朱恒等^[22]利用这种缠绕的方法通过制作 1 个 2×2 耦合分束器,将这种结构用于可调谐的折射率传感器。器件结构包括 2 个输入分支、1 个缠绕的耦合区域和 2 个输出分支。耦合区域周围介质的变化引起折射率的变化,从而引起耦合区有效折射率的变化,进而导致输出分支的分光比的变化,分光比的变化可以通过 2 个输出分支的光功率来测量。图 6 给出了红绿蓝三色光在折射率传感器中的光学传输图像,其中纳米光纤的直径为 440 nm,耦合区域有 4 个扭曲缠绕。结果表明,探测光的波长越长,传感器的灵敏度越高。

研究发现,可以通过改变耦合区域的扭缠圈数和输入/输出分支角来改变器件的传感灵敏度。当周围环境的折射率改变相同值时,扭缠圈数越大,输出功率改变的

越快,传感器的灵敏度会随着扭缠圈数的增加而增加。在圈数增至某一值时,灵敏度达到最大值。当待测溶液的折射率范围是 $1.3321 \sim 1.3565$ (波长为 650 nm 红光),灵敏度在 23 圈时达到最大值。此时,传感器最大的灵敏度为 26.96 mW/RIU ,对折射率的检测极限为 1.85×10^{-7} 。同样可以计算出传感器对圈数的可调性为 1.2 mW 每单位折射率每圈。这可以与文献[35]中 10^{-7} 相比拟,并远好于其他文献报道的结果[例如:文献[36](4×10^{-6})、文献[37](5×10^{-4})和文献[38](1.4×10^{-5})]。通过改变传感器的扭缠圈数可以改变传感器的灵敏度,因此可以根据不同传感环境的需要选择合适的扭缠圈数的传感器。取扭缠圈数靠中间的 14 圈为例研究了输入/输出分支夹角对传感器可调性能的影响。分析得知,传感器的灵敏度随角度的增加而减小,对这一结果的解释为:当输出夹角增加,在有效耦合长度随之减小,灵敏度降低。对这一结果的另一解释为当输出夹角增大时,散射损耗将增大,折射率改变相同值功率改变值变小,根据灵敏度的定义可得知灵敏度将会降低。进一步可以计算得到传感器对角度的可调性能为 1.8 mW 每单位折射率每 5° 。

4.3 三级联 MZI

利用 PTT 纳米光纤还可组装级联的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)。器件长度从数十到数百微米^[23]。在

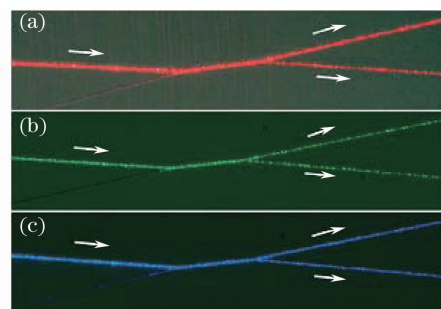


图 6 三种不同颜色光输入传感器的显微镜图。(a) 红光,波长为 650 nm,(b) 绿光,波长为 532 nm,(c) 蓝光,波长为 473 nm

Fig. 6 Optical microscopy images of the sensor (440 nm diameter) taken with. (a) red light (650 nm), (b) green light (532 nm), (c) blue light (473 nm)

显微镜下,通过显微操纵可以动态地调节 MZI 结构的臂长差。图 7 给出了红光在一个 3 级联的 MZI 结构中传输的图像,其中内图为器件未通光时的显微镜图片。器件是由直径为 900 nm 的 PTT 光纤组装的 3 个 MZI 级联的结构。每个拱形的 MZI 的长度和宽度分别为 $120\ \mu\text{m}$ 和 $32\ \mu\text{m}$ 。器件的总尺寸为 $470\ \mu\text{m} \times 32\ \mu\text{m}$,其远小于报道的聚合物/凝胶基单 MZI($3\ \text{cm} \times 15\ \mu\text{m}$)^[39],Si 基单 MZI(长度为 $2.5\ \text{mm}$)^[40],InP 基 MZI(长 $4.5\ \text{mm}$)^[41] 和 GaAs 基 MZI($12\ \text{mm} \times 6\ \text{mm}$)^[42];可与 SiO_2 微纳光纤基单 MZI^[43] 的尺寸相比拟。由于聚合物具有较高的机械强度和良好的弹性,可以组装出更小尺寸的器件。实验表明,当波长在 $1.3 \sim 1.6\ \mu\text{m}$ 之间时,器件具有较大的消光比(25 dB),测量的插入损耗在 $1.5 \sim 2.3\ \text{dB}$ 之间。

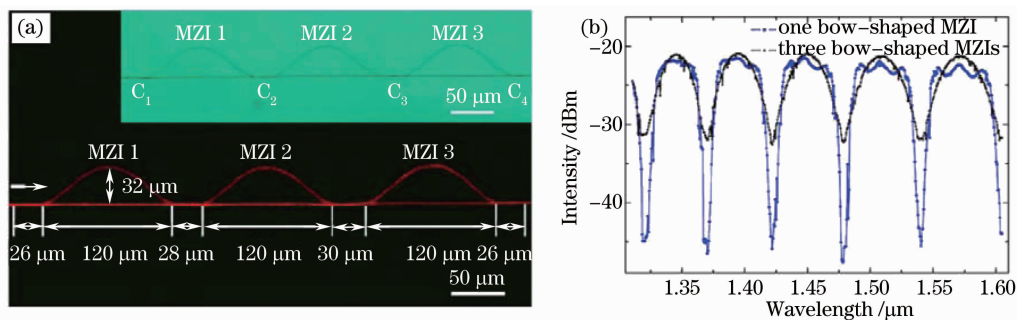


图 7 (a)红光在 3 个级联的 MZI 中传输的光学显微镜图像,(b)近红外波段的传输光谱

Fig. 7 (a) Optical microscope image of guided red light in three-cascaded MZIs, (b) transmission spectrum versus near-infrared wavelength

图 8 给出了绿光在环形谐振腔结构中传输的图像,这个结构是一个由两条直径为 480 nm 的 PTT 纳米光纤组装的环形结构,其环半径为 $6.5\ \mu\text{m}$ ^[20]。首先将纳米光纤 2(黄色)弯曲成环,通过范德华力在 A 点吸附在一起,然后通过吸附力,将纳米光纤 1(紫色)靠在纳米光纤 2 上,形成谐振腔结构。图 8 左上角的插图为器件的结构示意图,图 8 下方的插图给出了红光和蓝光在其中传输的光学显微镜图像。当环的半径满足条件时,会产生谐振现象。

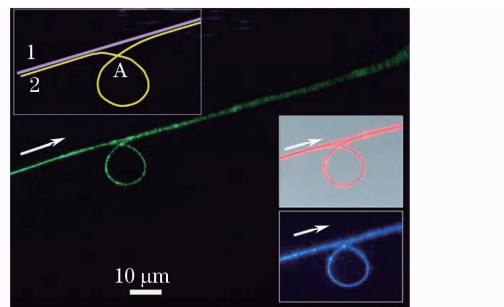


图 8 光在环形谐振腔结构中传输的光学显微镜图像

Fig. 8 Optical microscope image of guided lights in a ring resonator structure

5 结论和应用前景

从亚波长导光特性可知,PTT 纳米光纤具有较大的倏逝场,相当比例的光功率以倏逝波的形式在纳米光纤的物理边界外传输。基于较大的倏逝场,加上 PTT 纳米光纤具有低的传输损耗和良好的结构构筑能力,可以利用 PTT 纳米光纤构筑一些器件结构(例如耦合光分束器、级联 MZI 结构和环形谐振腔等),PTT 纳米光纤构筑的器件用作折射率传感器来探测周围环境介质的变化;具有结构紧凑、灵敏度高和低的探测极限是这类传感器的最重要的特征,也可用作生物化学传感器和粒子捕获^[44,45]。另外,由于纳米光纤具有强的光场约束、低的传输损耗、高比例的倏逝场分量和场增强作用的优点,可制作微纳光纤笔,直写曝光出亚微米范围内宽度可变的线条^[46]。

非线性效用与光强有关,光强越大非线性效应越强。较大的光强不仅可以通过提高光源的功率来获得,也可以通过缩小光波导的直径来获得。与常规通信光纤相比,光场在纳米光纤中限制的面积非常小,因此 PTT 纳米光纤也具有较大的非线性效应。我们下一步的工作,将从理论和试验上继续对 PTT 纳米光纤的光学性能进行研究,期待发现新的现象。

利用化学掺杂的方法^[47]来改变 PTT 材料的性能。例如,通过稀土离子(Er^{3+} , Yb^{3+} , Nd^{3+} , Tm^{3+} 等)和量子点掺杂 PTT 材料,利用一步拉制方法制作的 PTT 纳米光纤可以用作有源器件的研究。通过掺杂化学指示剂和荧光指示剂得到的 PTT 纳米光纤,可以得到响应快、灵敏度高的气体传感器。另外,通过表面镀膜^[48]的方法来改变 PTT 纳米光纤的折射率分布,可以有效地调节光纤的色散特性。

总之,一步拉制方法避免了使用传统的光刻技术,使得聚合物纳米光纤的制作及其器件的组装变得十分简单、快速、成本低廉。另外,PTT的应用开辟了一种新型的聚合物纳米光纤。利用一步拉制技术得到的聚合物纳米光纤直径均匀、表面光滑,具有良好的机械性能和光学性能,它对于构筑超紧凑的纳米光子学器件、超密集/小型化集成光路和纳米光学系统是十分有用的,在光通信、传感、非线性光学、光学操作等领域具有很大的应用潜力。

致谢 感谢中山大学光电材料与技术国家重点实验室李宝军教授的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 Barnes W. L., Dereux A., T. Ebbesen W.. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**: 824~830
- 2 Tong L., Gattass R. R., Ashcom J. B. *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, **426**: 816~819
- 3 Bara T.. Photonic crystals remember the light[J]. *Nat. Photon.*, 2007, **1**: 11~12
- 4 Xu Q., Schmidt B., Pradhan S. *et al.*. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, **435**: 325~327
- 5 Hu X., Jiang P., Ding C. *et al.*. Picosecond and low-power all-optical switching based on an organic photonic bandgap microcavity[J]. *Nat. Photon.*, 2008, **2**: 185~189
- 6 Mookherjea S., Park J. S., Yang S. H. *et al.*. Localization in silicon nanophotonic slow-light waveguides[J]. *Nat. Photon.*, 2008, **2**: 90~93
- 7 Law M., Sirbully D. J., Johnson J. C. *et al.*. Nanoribbon waveguides for subwavelength photonics integration[J]. *Science*, 2004, **305**(5688): 1269~1273
- 8 Tong L., Lou J., Gattass R. R. *et al.*. Assembly of silica nanowires on silica aerogels for microphotonic devices[J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(2): 259~262
- 9 Barrelet C. J., Greytak A. B., Lieber C. M.. Nanowire photonic circuit elements[J]. *Nano Lett.*, 2004, **4**(10): 1981~1985
- 10 Harfenist S. A., Cambron S. D., Nelson E. W. *et al.*. Direct drawing of suspended filamentary micro-and nanostructures from liquid polymers[J]. *Nano Lett.*, 2004, **4**(10): 1931~1937
- 11 Liu H., Edel J. B., Bellan L. M. *et al.*. Electrospun polymer nanofibers as subwavelength optical waveguides incorporating quantum dots[J]. *Small*, 2006, **2**(4): 495~499
- 12 Lyoo W. S., Lee H. S., Ji B. C. *et al.*. Effect of zone drawing on the structure and properties of melt-spun poly(trimethylene terephthalate) fiber[J]. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2001, **81**(14): 3471~3480
- 13 Chuah H. H.. Orientation and structure development in poly(trimethylene terephthalate) tensile drawing [J]. *Macromolecules*, 2001, **34**(20): 6985~6993
- 14 Kelsey D. R., Kiibler K. S., Tutunjian P. N.. Thermal stability of poly(trimethylene terephthalate)[J]. *Polymer*, 2005, **46**(21): 8937~8946
- 15 Hwo C., Forschner T., Lowtan R. *et al.* Poly(trimethylene phthalates or naphthalate) and copolymers: new opportunities in film and packaging applications[J]. *J. Plastic Film & Sheeting*, 1999, **15**(3): 219~234
- 16 Chuah H. H., Chang B. T. A.. Crystal orientation function of poly(trimethylene terephthalate) by wide-angle X-ray diffraction[J]. *Polym. Bulletin*, 2001, **46**(4): 307~313
- 17 Chuah H.. Intrinsic birefringence of poly(trimethylene terephthalate)[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polym. Phys.*, 2002, **40**(14): 1513~1520
- 18 Xing X., Zhu H., Wang Y. *et al.*. Ultracompact photonic coupling splitters twisted by PTT nanowires[J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(9): 2839~2843
- 19 Xing X., Wang Y., Zhu H. *et al.*. Nanofiber drawing and nanodevice assembly in poly(trimethylene terephthalate)[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(14): 10815~10822
- 20 Xing Xiaobo. Polymer-based nanofiber drawing and device assembly[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2008
邢晓波. 聚合物纳米光纤制作及其器件组装[D]. 广州: 中山大学, 2008
- 21 He W., Li B., Pun E. Y.. Wavelength, cross-angle, and core-diameter dependence of coupling efficiency in nanowire evanescent wave coupling[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(10): 1597~1599
- 22 Zhu H., Wang Y., Li B.. Tunable refractive index sensor with ultracompact structure twisted by poly(trimethylene

- terephthalate) nanowires[J]. *ACS Nano*, 2009, **3**(10): 3110~3114
- 23 Wang Y., Zhu H., Li B.. Cascaded Mach-Zehnder interferometers assembled by submicrometer PTT wires[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(16): 1115~1117
- 24 Guo M., Shi J., Li B.. Polymer-based micro/nanowire structures for three-dimensional photonic integrations[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(18): 2104~2106
- 25 Shi J., Guo M., Li B.. Assembly of arbitrary and vertical optical couplers using flexible polymer micro/nanowires[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(12): 121101
- 26 Tong L., Lou J., Mazur E.. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1025~1035
- 27 Huang W. P., Xu C. L., Lui W. *et al.*. The perfectly matched layer (PML) boundary condition for the beam propagation method[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(5): 649~651
- 28 Xing X., Deng X., Li B. *et al.*. Analysis of GaN-based single-mode rib waveguide with large cross section[J]. *J. Microlith. Microfab. Microsyst.*, 2006, **5**(3): 033009
- 29 Huang W. P., Xu C. L., Chaudhuri S. K.. A finite-difference vector beam propagation method for three dimensional waveguide structures[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(2): 148~151
- 30 Huang W. P., Xu C. L., Chu S. T. *et al.*. The finite-difference vector beam propagation method; analysis and assessment [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**: 295~305
- 31 Kim Y., Jeong Y., Oh K. *et al.*. Multiport $N \times N$ multimode air-clad holey fiber coupler for high-power combiner and splitter[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20): 2697~2699
- 32 Kim D. U., Bae S. C., Kim J. *et al.*. Hard polymer cladding fiber (HPCF) links for high-speed short reach 1×4 passive optical network (PON) based on all-HPCF compatible fused taper power splitter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11): 2355~2357
- 33 Wang Z. T., Fan Z. C., Xia J. S. *et al.*. 1×8 cascaded multimode interference splitter in silicon-on-insulator[J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(8): 5085~5087
- 34 Raburn M., Liu B., Abraham P. *et al.*. Double-bonded InP(InGaAsP) vertical coupler $1:8$ beam splitter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(12): 1639~1641
- 35 He Z., Zhu Y., Du H.. Long-period gratings inscribed in air and water filled photonic crystal fiber for refractometric sensing of aqueous solution[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(4): 044105
- 36 Tazawa H., Kanie T., Katayama M.. Fiber-optic based refractive index sensor and its application to biosensing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(11): 113901
- 37 Polynkin P., Polynkin A., Peyghambarian N. *et al.*. Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1273~1275
- 38 Liang W., Huang Y., Xu Y. *et al.*. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(15): 151122
- 39 Enami Y., Derosé C. T., Mathine D. *et al.*. Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 180~185
- 40 Liu A., Jones R., Liao L. *et al.*. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. *Nature*, 2004, **427**: 615~618
- 41 Kuznestov M.. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division-multiplexed optical system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~230
- 42 Hu M. H., Huang Z., Hall K. L. *et al.*. An integrated two-stage cascaded Mach-Zehnder device in GaAs[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(8): 1447~1455
- 43 Li Y., Tong L.. Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 303~305
- 44 Wu Zhongfu, Liu Zhihai, Guo Chengkai *et al.*. Numerical simulation and experiments of two fiber optical tweezers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1971~1976
- 吴忠福, 刘志海, 郭成凯 等. 两种单光纤光镊捕获效果的数值仿真与实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1971~1976
- 45 Zhao Chujun, Fan Dianyuan, Zhou Ping *et al.*. Power distribution characteristics of tapered fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 422~425
- 赵楚军, 范滇元, 周萍 等. 锥形光纤的功率分布特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 422~425
- 46 Tian Feng, Yang Guoguang, Bai Jian *et al.*. Direct writing of submicron lines using the micro-and nanofiber pens[J]. *Acta*

Optica Sinica, 2010, **30**(1): 206~209

田 丰, 杨国光, 白 剑 等. 亚微米线条的微纳光纤笔直写技术研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 206~209

47 Chen Xi, Zhang Ru, Wang Jin. A novel optical fiber doped with semiconductor nano-particles[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1528~1531

陈 曦, 张 茹, 王 瑾. 一种新型掺杂半导体纳米微粒光纤[J]. 中国激光, 2008, **35**(10): 1528~1531

48 Gu Zhengtian, Deng Chuanlu. Application and development of coated fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1317~1326

顾铮先, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. 中国激光, 2009, **36**(6): 1317~1326