





主管: 中国科学院

主办:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国物理学会发光分会

主编: 申德振

CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE

### 微米光子回路中能量的荧光显示与调节

梁定鑫,李梦洁,张亚平,贾洪一,佘淋淋,林志立,戴昊,张奚宁,吴志军,蒲继雄

#### 引用本文:

梁定鑫, 李梦洁, 张亚平, 等. 微米光子回路中能量的荧光显示与调节[J]. 发光学报, 2020, 41(5): 610-616. LIANG Ding-xin, LI Meng-jie, ZHANG Ya-ping, et al. Energy Observation and Adjustment of Micro Photonic Circuits[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(5): 610-616.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/fgxb20204105.0610

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 染料掺杂聚合物光纤的荧光及其光谱下转换性质

Fluorescence and Spectral Down-conversion Characterization of Dye-doped Polymer Fibers 发光学报. 2014, 35(3): 269-275 https://doi.org/10.3788/fgxb20143503.0269

#### Eu3+激活K2CaP2O7荧光粉的制备和发光性质

Preparation and Luminescence Properties of Eu3 + Activated K2CaP2O7 Phosphors 发光学报. 2018, 39(2): 121–126 https://doi.org/10.3788/fgxb20183902.0121

### 竖直生长有机单晶微米线的制备及其光波导性能

Synthesis of Vertical Organic Microwires and Their Optical Properties 发光学报. 2017, 38(6): 709-714 https://doi.org/10.3788/fgxb20173806.0709

# 染料掺杂聚合物薄膜的光谱下转换研究

Spectral Down-conversion of Dye-doped Polymer Films 发光学报. 2014, 35(8): 917-921 https://doi.org/10.3788/fgxb20143508.0917

#### CH3 NH3 PbBr3表面修饰对SnO2基光电探测器性能的影响

Effect of Surface Decoration of CH3 NH3 PbBr3 on Performance of SnO2-based Photodetector 发光学报. 2019, 40(10): 1261-1266 https://doi.org/10.3788/fgxb20194010.1261

May, 2020

文章编号: 1000-7032(2020)05-0610-07

# 微米光子回路中能量的荧光显示与调节

梁定鑫<sup>1</sup>,李梦洁<sup>1</sup>,张亚平<sup>1</sup>,贾洪一<sup>1</sup>,佘淋淋<sup>1</sup>,林志立<sup>1</sup>,戴 昊<sup>2</sup>, 张奚宁<sup>1</sup>\*,吴志军<sup>1</sup>,蒲继雄<sup>1</sup>

- (1. 华侨大学信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021;
  - 2. 厦门大学海洋与地球学院 海洋观测技术研发中心, 福建 厦门 361005)

摘要:基于弯曲的罗丹明 B(rhodamine B)掺杂聚合物微米线,搭建了 Y 型分束器、微米线-环形腔耦合结构等典型微米光子回路;采用锥形光纤耦合的方式,将光能量导入回路并在微米线中激发荧光;通过移动锥形光纤增加光的传输距离,分析能量的输出强度与传输长度之间的关系。研究发现,通过激发出的荧光光路强度,可显示回路中的能量沿微米线轴线周期性地衰减振荡,并在微米线弯折处发生相位跃变;回路输出端能量随传输距离的增加呈周期性变化,且在半个周期内,可将 Y 型分束器分光比从 1.3 调节到 2.4(<2 μm),使耦合结构中单个输出端的强度峰谷比达到 2.1(<6 μm)。利用锥形光纤耦合激发出的荧光,可在远场直接显示回路的能量传输状态,并在传输距离改变时对能量的耦合情况进行实时反映,实现回路输出性能的大范围调节,为复杂微光子器件的搭建及性能调节提供了一种直观、简便的方法。

关 键 词:聚合物微米线;荧光掺杂;能量显示;能量调节;光子回路 中图分类号:TN252;TN253 文献标识码:A DOI: 10.3788/fgxb20204105.0610

# **Energy Observation and Adjustment of Micro Photonic Circuits**

LIANG Ding-xin<sup>1</sup>, LI Meng-jie<sup>1</sup>, ZHANG Ya-ping<sup>1</sup>, JIA Hong-yi<sup>1</sup>, SHE Lin-lin<sup>1</sup>, LIN Zhi-li<sup>1</sup>, DAI Hao<sup>2</sup>, ZHANG Xi-ning<sup>1</sup>\*, WU Zhi-jun<sup>1</sup>, PU Ji-xiong<sup>1</sup>

(1. Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation,

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Institute of Ocean Exploration Technology, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

\* Corresponding Author, E-mail; zhangxining1014@163.com

Abstract: We assemble typical micro photonic circuits based on rhodamine B doped polymer microfibers (RhB doped PMFs), such as Y beam splitter and microfiber-ring cavity coupling structures. Through the tapered fiber, a 532 nm incident light is launched into the RhB doped PMFs and excited the fluorescence simultaneously. The propagation distance of the energy could be increased by moving the tapered fiber along the PMF. We analyze the relationship between the propagation distance and the output intensities of the coupling structures. The results show that the energy distribution in the doped PMF could be visualized according to the fluorescent path in the circuit. Along the straight part of PMF, the energy propagates decreasingly with a periodic oscillation. Significant phase jump could be observed at the curved part. Moreover, the output intensity of the circuit also has a periodic variation with the increasing propagation distance. By simply moving the tapered fiber in a half period, the split ratio of the Y splitter could be adjusted from 1.3 to 2.4 (within 2 μm) while the peak-to-valley ratio of the output intensity in the ring cavity structure could reach 2.1

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-03-03 基金项目: 国家自然科学基金(61505056)资助项目 (within 6 µm). For the fluorescence excited by the tapered fiber in the coupling structure, we could directly observe the energy distribution in real-time from optical far field. A large changing range of the output intensity could be realized by simply moving the tapered fiber within a few micrometers. Our results demonstrate a visible and simple approach for photonic circuit fabrication and adjustment.

Key words: polymer microfiber; fluorescent doping; energy observation; energy adjustment; photonic circuit

# 1 引言

近年来,以微纳光纤、聚合物微米或纳米线等为 代表的各类微纳光波导由于具有优异的光学特性, 广泛地用于搭建多种波导光子器件回路[12]。而微 纳光波导之间的耦合条件极大地影响了诸如耦合 器[3]、环形腔[45]和微型激光器[6]等经典光子器件的 性能。许多理论模拟研究工作已经揭示了在单根弯 曲纳米线[7]、双平行纳米线[89]和自耦合纳米线[10-11] 中的能量传输行为。然而,研究表明,在直径为微米 量级的光波导中,光束以多模形式传输,使微米光波 导中的能量分布更加复杂[12-13]。同时,为了在实验 上直接观测到波导的能量分布,便于器件及回路的 性能调节,有些研究者将不同的荧光染料覆盖在金 属纳米线[1415]的表面上,或在微米线中掺入稀土元 素[16]进行远场成像。这些研究大多集中在对直线 型微米(纳米)线中能量分布的直接成像上,而对由 弯曲波导构成的回路中光能量分布情况的讨论十分 有限。

本研究首先在聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl methacrylate, PMMA)微米线中掺杂罗丹明B(Rhodamin B, RhB),通过波导直接耦合的方式激发微米线中的荧光,对弯曲的微米光波导中的能量分布进行表征;利用荧光指示,对基于弯曲掺杂微米线的多种光子回路的输出能量进行调节;通过荧光指示,可以在光学显微镜下直接观测到基于微环回路中的能量传输。在确定的耦合条件下,根据可视化的荧光路径,可以改变传输距离来调整光输出特性。染料掺杂的聚合物微米线中周期振荡的荧光光路可用于显示弯曲光子回路中的能量传输和指导光学调节。本文的结果为调节弯曲光子回路和耦合结构的光学特性提供了一种简便的方法。

# 2 实验材料与装置

将 2.4 mg RhB 掺杂到溶解了 750 mg PMMA

的氯仿溶液中,并通过溶液拉伸法制备荧光物质掺杂的聚合物微米线(Polymer microfiber, PMF)<sup>[17]</sup>。由该方法得到的 RhB 掺杂 PMF 典型直径在 1.0 ~1.8 μm 之间。

实验装置如图 1 所示。在光学显微镜下,将RhB 掺杂 PMF 放置到氟化镁(MgF<sub>2</sub>)衬底上,用微纳操作将其弯曲组装成光子回路<sup>[18]</sup>。通过使用火焰拉锥法,从标准光纤中拉制锥形光纤<sup>[19]</sup>。将一束波长为 532 nm 的连续激光导入该锥形光纤,通过倏逝波耦合的方法,实现 RhB 掺杂 PMF中的光束传输及荧光激发<sup>[20]</sup>。

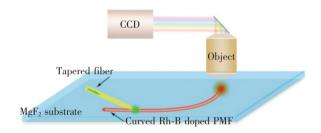


图 1 锥形光纤和弯曲 RhB 掺杂 PMF 间的倏逝波耦合示意图,绿色箭头为人射光的方向。

Fig. 1 Schematic illustration of evanescent coupling between a tapered fiber and a curved RhB-doped PMF. The green arrow indicates the direction of the incident light.

通过置于光学显微镜上的 CCD 相机,记录光激发时弯曲微米线或光子回路的光学显微图像。截取结构输出端光点的暗场光学图像(64×64像素),并将其转化为灰度值来表示弯曲微米线或光子回路的输出光强<sup>[21-22]</sup>。

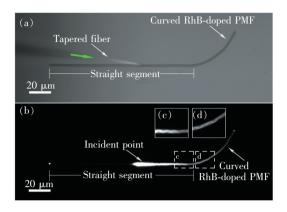
### 3 结果与讨论

### 3.1 单根弯曲微米线的荧光激发

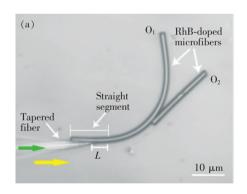
通过微操作,将直径为 1.5 μm 的 RhB 掺杂 PMMA 微米线一端弯曲,其曲率半径~35.5 μm。通过锥形光纤直接将波长为 532 nm 的激发光耦合进微米线中部,如图 2(a)所示。

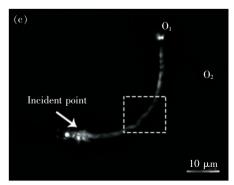
当入射光进入弯曲微米线时(如图 2(b)所示).

激发微米线中 RhB 荧光,使微米线在轴线方向上 出现明显的荧光光路,且随着光束传输距离的增



- 图 2 单根 RhB 掺杂 PMF 中荧光的波导激发。(a) 明场 光学图像,绿色箭头为入射光的方向;(b) 对应的 暗场光学图像;(c)~(d)(b)图中所示直线部分与 弯曲部分对应的放大图。
- Fig. 2 Bright-field(a) and dark-field(b) optical images of single RhB-doped PMF excited by optical waveguiding. The green arrow indicates the direction of the incident light. (c) - (d) Enlarge images in (b) are corresponding to the straight part and the curved part denoted by the dashed boxes respectively.





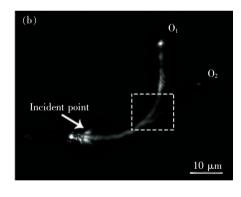
加,荧光强度逐渐变弱。通过弯曲部分前端的直线波导放大图(图 2(c))可知,在直线波导部分,光能量以周期性振荡的方式向前传输,周期为~4.0 μm。而弯曲部分的放大图(图 2(d))显示,波导中能量分布的波形发生跃变。这主要是由于微米线中的光束在弯折部分发生相位跃变、能量泄露形成的。由此可知,将聚合物微米线进行荧光掺杂后,可通过倏逝波耦合的激发方式,在实验上直接观测到直线型波导和弯曲波导中的能量分布的不同特点。

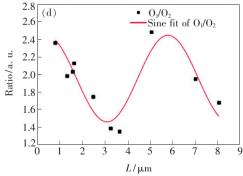
### 3.2 基于掺杂微米线的弯曲光子回路器件

### 3.2.1 弯曲 Y 型分束器

Y 型分束器是构成光子回路系统的重要光子结构之一。如图 3 所示,利用两根直径相同 (~1.2  $\mu$ m)的 RhB 掺杂 PMMA 微米线,可组装成 Y 型分束器。弯曲的输入端(曲率半径~16.1  $\mu$ m)有利于缩小回路的整体尺寸。弯曲波导的两端分别为输入端和输出端  $O_1$ ,另一短分支的输出端为  $O_2$ ,分支与弯曲微米线的耦合长度~2.0  $\mu$ m,耦合角度~30°。

入射光(532 nm)从左端通过锥形光纤耦合





- 图 3 弯曲 Y 型分束器的光强调节。(a)弯曲 Y 型分束器的明场光学显微图像,绿色箭头为入射光输入方向,黄色箭头为锥形光纤的移动方向; $L=7.0~\mu m(b)$ 和  $L=5.1~\mu m(c)$ 时该分束器的暗场显微图像;(d)分光比随 L的变化曲线。
- Fig. 3 Optical energy adjustment of a bent Y-beam splitter. (a) Bright-field optical micro-image of a Y beam splitter. Dark-field micro-images of the splitter with  $L=7.0~\mu m(\,b\,)$  and  $L=5.1~\mu m(\,c\,)$ , respectively. (d) Dependence of the bent splitter ratio on L.

到弯曲 Y 分束器的输入端,沿 Y 型分束器输入端 的水平部分移动锥形光纤,可改变输入端到弯曲 点的距离(L)。通过激光激发得到的荧光光路, 可以观测到弯曲Y型分束器内部的能量传输并 调节其光学特性。图 3(b)显示了  $L \approx 7.0 \mu m$  时 通光后分束器的暗场显微图像。根据微米线中荧 光的激发情况直接观察到,光束经输入分支传输 后,能量在分束器耦合区分光(图3(b)虚线框), 且 0, 和 0, 端有明显的输出光斑。这表明尽管波 导存在较大程度的弯曲,但分束器的分束效果仍 较为明显。当将锥形光纤缓慢向右水平移动到  $L\approx5.1 \,\mu\text{m} \,\text{时}(图3(c)), 分束器耦合区的荧光光$ 路显示,几乎没有能量耦合进入短分支,且 0,端 光斑强度有所增加,而 0,端已无明显光斑。这是 由于锥形光纤的移动,输入耦合点的位置发生了 改变,使掺杂 PMF 中光束传播的相位发生了变 化,从而影响了弯曲 Y 型分束器的分光效果[16]。 由此说明通过荧光光路可直接反映回路的耦合状 态,且传输距离的改变可以调整简单回路的输出 强度。

为了进一步分析弯曲分束器的分光特性与传输距离的关系,图 3(d) 计算了不同 L 时,该分束器两输出端的分光比 $(O_1/O_2)$ 。对数据点进行正弦函数拟合,发现当 L 在  $0.8 \sim 8.0~\mu m$  范围变化时,分光比随 L 的增加呈周期变化(周期为  $\sim 5~\mu m$ ),变化范围为  $1.3 \sim 2.4$ 。这种振荡变化主要是由于在水平输入分支中传输能量的相位发生改变,从而导致弯曲分束器耦合区耦合效率的变化 (16)。

### 3.2.2 微米线-环形腔耦合结构

利用 RhB 掺杂 PMF 中的荧光指示,还可在 实验上直接对复杂光子回路中的能量分布特点进 行成像。

以单根光波导与环形腔的耦合结构为例。使用直径为 350 nm 的纳米线 PMMA 微环水平耦合 (图 4(a)),组成该微环的微米线直径为 1 μm,微环直径为 16 μm。通过 COMSOL 计算该结构中的能量,发现当输入光波长为 532 nm 时,在 PMMA环腔内能量会形成稳定振荡。

类似地,在实验上搭建的基于 RhB 掺杂 PMF

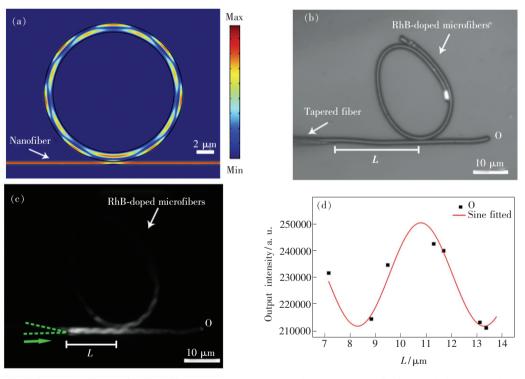


图 4 直线型微米线-环形腔光子回路的光学特性。(a)环形腔和纳米线之间的倏逝波耦合能量分布图;(b)微环腔的明场光学显微图像;(c) $L=13.5~\mu$ m的微环的暗场显微图像,绿色虚线表示光纤锥的形状,绿色箭头指示 532 nm 光的输入方向;(d)微环输出强度与L的关系曲线。

Fig. 4 Optical properties of a microring coupled to a straight waveguide. (a) Power map of evanescent coupling between a microring cavity and a nanofiber. (b) Bright-field optical micro-image of a micro-ring cavity on  $MgF_2$  substrate. (c) Darkfield microimage of the micro-ring with  $L=13.5~\mu m$ . (d) Dependence of the microring output intensity on L.

的环形光子回路,如图 4(b)所示。直径为 1.8 μm 的掺杂 PMF 弯曲成自耦合长度为 8.0 μm 的环形腔后,与另一根直径相同的直线型掺杂 PMF 水平耦合,两者耦合长度为 ~4.0 μm。在该单根微米线-环形腔回路中,激发光(532 nm)通过锥形光纤从直线型 PMF 左侧耦合进入环形腔回路。

单根 PMF-环形腔回路在通光时的典型暗场光学图像如图 4(c)所示,此时输入点与耦合点之间的距离  $L\approx13.5~\mu m$ 。根据发射出的荧光可以看出,回路中传导的能量首先沿单根 PMF 传输,随后在耦合区分成两部分:一部分能量传导到环形腔中,并形成了振荡的荧光光路,这种能量分布形式与图 4(a) 的模拟结果相似;另一部分能量继续沿单根 PMF 向前振荡,最终从输出端 0 输出。

单根微米线-环形腔回路中的分束效应也与传输距离有关。截取并计算 L 不同时,输出端 O 的强度,得到如图 4(d)所示的关系曲线变化图。锥形光纤沿单根微米线移动时,耦合条件不变<sup>[21]</sup>。

通过图 4(d) 中实线所示的光强拟合曲线可

知,输出光强随着 L 呈现正弦曲线变化。特别地,当 L 从 11.5  $\mu$ m 变化到 13.5  $\mu$ m 时,环形耦合结构的输出光强急剧衰减。这表明更多的能量耦合到环形腔中。因此,通过 RhB 掺杂 PMF 结构中的荧光指示,可以调整锥形光纤的耦合位置,控制能量在环形腔中的传输,且只需要移动~2  $\mu$ m 即可实现输出光强的大幅度改变。

除了可利用回路发射的荧光,通过移动锥形光纤实现环形腔回路中的能量调节外,回路中的荧光还可以直观地表征环形腔内部的能量传输。图 5 为多根直径为~1.5  $\mu$ m 的 RhB 掺杂的 PMF搭建成多根微米线与环形腔耦合的光子回路结构。图 5(a)的光学明场图像中,带尾纤的环形腔直径和自耦合长度分别为~38.0  $\mu$ m 和~12.0  $\mu$ m。两个分支由耦合到该微环的两根微米线(PMF1和 PMF2)构成,其与环腔的耦合长度分别为~7.5  $\mu$ m 和~6.0  $\mu$ m,输出分别为  $\Omega$ 1和  $\Omega$ 2。由锥形光纤将连续激光(532 nm)导入到环形腔的尾纤中。输入端与环形腔自耦合点之间的距离(C1,可以通过沿尾纤水平移动锥形光纤来改变。

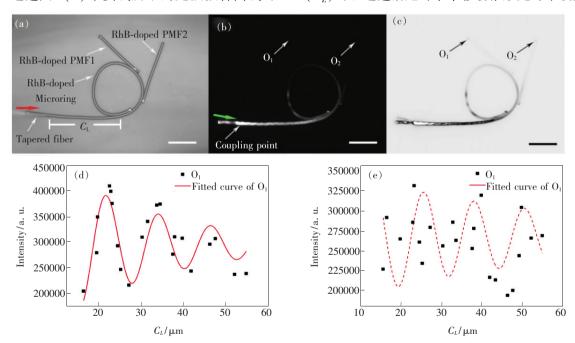


图 5 多根微米线-环形腔光子回路的光强度调节。(a)多根微米线-环形腔光子回路的明场光学显微图像,两根微米线分别为 PMF1 和 PMF2,红色箭头指示锥形光纤的移动方向;(b)多根微米线-环形腔光子回路通光时的暗场光学图像,绿色箭头指示入射光方向;(c)与图(b)对应反相差分图像;(d)~(e)PMF1 和 PMF2 输出光强与  $C_t$  的关系曲线,标尺为 20  $\mu$ m。

Fig. 5 Optical intensity adjustment of a multiple microfiber-microring photonic circuit. (a) Bright-field optical micro-image of a pigtail micro-ring cavity attached two RhB doped microfibers (PMF1 and PMF2). (b) Dark-field microimage of the multiple microfiber-microring photonic circuit excited by a 532 nm laser. (c) Corresponding reverse image of (b). Output intensity of PMF1(d) and PMF2(e) via  $C_L$ . Scale bars are 20  $\mu$ m.

由通光后的暗场光学图像(图 5(b),  $C_L \approx 41.0$   $\mu$ m)可知,多根微米线-环形腔回路中尾纤部分的 荧光被充分激发,能量沿波导振荡向前传输。由 发射荧光的强度推知,回路中大部分能量绕行于环形腔内,少部分能量耦合进入两分支中。为了 更清楚地观测两个输出分支中的能量分布情况,将图 5(b)进行反相处理,得到的差分反相图如图 5(c)所示。两个分支整体亮度较低,输出强度较弱,说明两分支中用于激发荧光的入射光能量较低,回路中能量较少。

通过沿尾纤的水平部分缓慢推动锥形光纤,PMF1 和 PMF2 的输出强度会随  $C_L$  变化。采用公式  $I = A + Be^{-Cx}\sin(Dx + E)$ ,对  $O_1$  和  $O_2$  的光强变化进行拟合,其中,x 为实验中的  $C_L$ ,A、B、C、D 和 E 分别为拟合系数。 $O_1$  的输出强度变化如图 S(d) 所示。根据拟合曲线(红色实线), $O_1$  振荡的周期约为 S(d) 加。这种周期性振荡主要是由于环形腔内传输能量的相位变化导致的S(d) 。当S(d) 的强度最大,此时一个周期内的强度峰谷比达到 S(d) 心障值逐渐减小(拟合系数 S(d) 心管值逐渐减小(拟合系数 S(d) 心影,我们认为这主要是由于传输损耗增加引起的。类似的强度振荡现象在 S(d) 中也有所体现。如图 S(d) 所示,

根据拟合线(红色虚线), $O_2$  的输出强度以~12.3  $\mu$ m 周期改变,一个周期内强度的最大峰谷比为~1.6。与  $O_1$  相比, $O_2$  的峰谷比较低主要是由两者与环形腔结构的耦合条件不同引起的<sup>[8,23]</sup>。而比较  $O_1$  和  $O_2$  的拟合曲线可知, $O_2$  峰值随传输长度增加而衰减的趋势较  $O_1$  的小(拟合系数 C=0.018)。说明  $O_2$  分支中能量衰减明显小于  $O_1$  分支。

# 4 结 论

本文通过锥形光纤的波导耦合方式激发掺杂 PMF 中的 RhB 荧光。通过荧光发射,可直接从远场观测波导微光子回路中的能量分布特点及耦合状态。弯曲 Y 型分束器、微米线-环形腔耦合结构等典型光子回路的输出光强随光束传输长度的减小呈周期性变化,周期小于 10 μm;利用发射荧光的显示及这种变化特征,可在小范围调整回路通光长度(通常在半个周期内),实时观测回路的耦合状态,并使回路输出得到大范围调节。利用波导中的荧光显示,可在远场直观、实时反映回路耦合状态,对其光学性能进行调整,为微光子回路的搭建、集成与性能调节提供了一种灵活的方法。

### 参考文献:

- [ 1 ] LIU X W, KUANG C F, HAO X, et al. . Fluorescent nanowire ring illumination for wide-field far-field subdiffraction imaging [ J ]. Phys. Rev. Lett., 2017,118(7):076101-1-6.
- [2] CHEN B G, WU H, XIN C G, et al. . Flexible integration of free-standing nanowires into silicon photonics [J]. Nat. Commun. , 2017,8(1):20-1-7.
- [3] TONG L M, LOU J Y, GATTASS R R, et al. . Assembly of silica nanowires on silica aerogels for microphotonic devices [J]. Nano Lett., 2005,5(2):259-262.
- [4] SONG QH, LIU LY, XUL. Lasing action in dye doped polymer nanofiber knot resonator [J]. J. Lightwave Technol., 2009,27(19):4374-4376.
- [ 5 ] ZHANG X N, LIANG D X, DAI H, et al. . Energy attenuations in single microfiber and double-loop cavity supported by optical substrate [J]. Appl. Opt., 2018,57(31):9351-9357.
- [6] LI H Y, LI J, QIANG L S, et al.. Single-mode lasing of nanowire self-coupled resonator [J]. Nanoscale, 2013,5(14): 6297-6302.
- [7] YU H K, WANG S S, FU J, et al.. Modeling bending losses of optical nanofibers or nanowires [J]. Appl. Opt., 2009, 48(22):4365-4369.
- [8] HUANG K J, YANG S Y, TONG L M. Modeling of evanescent coupling between two parallel optical nanowires [J]. *Appl.* Opt., 2007, 46(9):1429-1434.
- [ 9 ] HONG Z H, LI X W, ZHOU L J, et al. . Coupling characteristics between two conical micro/nano fibers; simulation and experiment [J]. Opt. Express, 2011,19(5):3854-3861.

- [10] WEI C, LIU S Y, ZOU C L, et al. . Controlled self-assembly of organic composite microdisks for efficient output coupling of whispering-gallery-mode lasers [J]. J. Am. Chem. Soc., 2015,137(1):62-65.
- [11] ZHANG C,ZOU C L,ZHAO Y, et al.. Organic printed photonics; from microring lasers to integrated circuits [J]. Sci. Adv., 2015,1(8);e1500257-1-7.
- [12] 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.
- [13] JUNG Y M, BRAMBILLA G, RICHARDSON D J. Optical microfiber coupler for broadband single-mode operation [J]. Opt. Express, 2009, 17(7):5273-5278.
- [14] WEI H, LI Z P, TIAN X R, et al.. Quantum dot-based local field imaging reveals plasmon-based interferometric logic in silver nanowire networks [J]. Nano Lett., 2011,11(2):471-475.
- [15] WEI H, WANG Z X, TIAN X R, et al. . Cascaded logic gates in nanophotonic plasmon networks [J]. Nat. Commun., 2011, 2;387.
- [16] CHEN B G, BAO Q Y, TONG L M. Direct observation of multimode interference in rare-earth doped micro/nanofibers [J]. Opt. Express, 2019,27(19):26728-26737.
- [17] GU F X, ZHANG L, YIN X F, et al. Polymer single-nanowire optical sensors [J]. Nano Lett., 2008, 8(9):2757-2761.
- [18] GUO X, QIU M, BAO J M, et al.. Direct coupling of plasmonic and photonic nanowires for hybrid nanophotonic components and circuits [J]. Nano Lett., 2009, 9(12):4515-4519.
- [19] TONG L M, GATTASS R R, ASHCOM J B, et al. . Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. Nature, 2003,426(6968):816-819.
- [20] GU F X, YU H K, WANG P, et al. . Light-emitting polymer single nanofibers via waveguiding excitation [J]. ACS Nano, 2010,4(9):5332-5338.
- [21] MA Y G, LI X Y, YU H K, et al.. Direct measurement of propagation losses in silver nanowires [J]. Opt. Lett., 2010, 35(8):1160-1162.
- [22] WANG W H, YANG Q, FAN F R, et al. . Light propagation in curved silver nanowire plasmonic waveguides [J]. Nano Lett., 2011, 11(4):1603-1608.
- [23] MA Y G, LI X Y, YANG Z Y, et al. . Pigtailed CdS nanoribbon ring laser [J]. Appl. Phys. Lett., 2010,97(15):153122-1-3.



梁定鑫(1997 -),男,海南屯昌人, 硕士研究生,2017年于华侨大学获 得学士学位,主要从事荧光掺杂聚 合物微纳光纤方面的研究。

E-mail: laldx2017@163.com



张**奚宁**(1982 -),女,河北秦皇岛人,博士,讲师,2012年于浙江大学获得博士学位,主要从事微纳光子学方面的研究。

E-mail: zhangxining1014@163.com