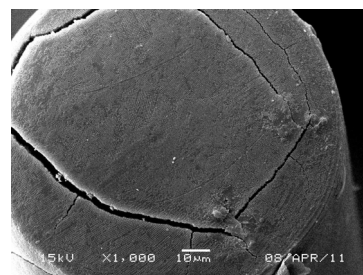




DOI: 10.12086/oe.2018.180168

胶体光子晶体修饰光纤及相对湿度检测应用

潘超¹, 周俊萍^{1,2}, 倪海彬^{1,2*}¹南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;²江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044

摘要: 本文提出了一种用胶体光子晶体来装饰单模光纤装饰端面的方法, 并说明了这种结构用于相对湿度传感器的原理。研究了用垂直沉积法在光纤端面制备 PS(polystyrene)胶体晶体、复合胶体晶体和 SiO₂反蛋白石(inverse opal)的技术, 用扫描电子显微镜表征了制备得到的胶体晶体及反蛋白石, 测量了端面被胶体晶体修饰光纤的反射光谱, 并测试了光纤端面复合光子晶体的相对湿度传感特性。提出了一种毛细管-光纤结构, 提高了生长在光纤端面处胶体晶体的质量和其机械稳定性。

关键词: 胶体晶体; 光纤; 反蛋白石; 反射光谱

中图分类号: O734; TN253

文献标志码: A

引用格式: 潘超, 周俊萍, 倪海彬. 胶体光子晶体修饰光纤及相对湿度检测应用[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 180168

Colloidal photonic crystal modified optical fiber and relative humidity detection application

Pan Chao¹, Zhou Junping^{1,2}, Ni Haibin^{1,2*}¹School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;²Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Signal Processing, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract: This paper propose a route to decorated end facet of single mode optical fibers with colloidal photonic crystals and present the principle for this structure to be used as relative humidity sensing. The approaches of preparing PS colloidal crystals, composite colloidal crystals, and SiO₂ inverse opals on the end faces of optical fibers by vertical deposition was studied. The prepared colloidal crystals and inverse opal were structurally characterized, and the reflection spectra of the photonic crystals-modified microstructure optical fibers was measured. The relative humidity sensing characteristics of composite photonic crystals decorated microstructure optical fibers were tested. Finally, a capillary-fiber structure was proposed to improve the quality and mechanical stability of the colloidal crystals fabricated on the fiber endfaces.

收稿日期: 2018-02-09; 收到修改稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61605082); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20160969); 江苏省高校基金资助项目(16KJB510020); 江苏省高等教育重点学科建设项目资助项目(PAPD); 国家博士后基金资助项目(2017M611654); 江苏省博士后基金资助项目(1701074B); 南信大人才启动基金资助项目(2015r040); 江苏省气象观测与信息处理重点实验室开放项目资助项目(KDXS1506)

作者简介: 潘超(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感, 纳米光电传感的研究。E-mail: 18252083360@163.com

通信作者: 倪海彬(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感, 纳米光电传感的研究。E-mail: nihaibin@nuist.edu.cn

Keywords: colloidal crystals; micro structure optical fibers; inverse opal; relative humidity sensing

Citation: Pan C, Zhou J P, Ni H B. Colloidal photonic crystal modified optical fiber and relative humidity detection application[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180168

1 引言

光子晶体是在空间周期性分布不同折射率介质的一类材料,最显著的特征是具有光子带隙,带隙的位置与材料最小周期尺寸成正比。胶体自组装的方法是一种研究较多的制备带隙在可见及近红外波段光子晶体的方法,其特点是制备成本较低,能够制备出约 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 面积高质量的光子晶体;自组装形成的胶体晶体可以作为模板,往其空隙中填充其它材料,去除模板后得到有序多孔结构,即反蛋白石(inverse opal)结构。反蛋白石具有很低的体积填充率(<26%),较大的表面积以及良好的内部连通性,在催化、传感、组织材料等方面有广泛的应用前景。Sol-gel 协同自组装是将胶体晶体模板制备与填充溶胶同步进行的一种简便有效的方法,它既减少了制备的步骤,又避免了因溶胶的填充、干燥引起的裂缝,以及填充的不均匀导致的缺陷,能够简便地制备出高质量大面积的反蛋白石^[1-4]。光纤是目前使用最广泛的波导材料。光纤传感器也被广泛地应用,其中光纤湿度传感器更是被重点研究,如加载了互补裂环谐振器(complementary split ring resonator, CSRR)的薄模衬底集成波导(half-mode substrate integrated waveguide, HMSIW)谐振器被设计和制造用于湿度检测应用^[5];聚合物光纤湿度传感器被研究应用在人体皮肤湿度检测上^[6];基于氧化石墨烯的干涉型光纤湿度传感器,将石墨烯的亲水性运用到传感器上^[7];基于光纤锥和纤芯失配的干涉湿度传感器,将单模光纤和多模光纤渐变熔接光纤,色散补偿光纤熔接在两个多模渐变光纤之间^[8];光纤布拉格光栅嵌入单模-多模-单模(single-mode multimode single-mode, SMS)光纤结构的湿度传感器运用两种结构间的调制进行湿度检测^[9],但这些光纤湿度传感器在一定程度上受环境干扰。通过在光纤端面上自组装高质量胶体光子晶体,设计合理的结构,可以制备出具有实用价值的新型光纤传感、滤波器件^[10]。本文介绍了一种在单模光纤端面制备聚苯乙烯(Polystyrene, PS)胶体光子晶体、复合光子晶体以及 SiO_2 反蛋白石的方法,测试了 PS 胶体光子晶体的反射光谱,并验证了复合光子晶体的相对湿度传感特性,受环境干扰影响小,可以检测微弱的带隙信号。

2 理论推导

在一定的环境参数下自组装形成的胶体光子晶体是面心立方结构,面心立方结构的胶体光子晶体也叫蛋白石(opal),其密排面是{111}面,入射光波波阵面法线与{111}面法线夹角 θ 小于一定度数时,透射光谱会有明显的带隙,同时反射光谱有对应的峰值^[11-12]。峰值波长的计算公式可由式(1)给出:

$$\lambda_{\max} = 2d_{111} \sqrt{n_{\text{avg}}^2 - \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

其中: d_{111} 是{111}晶面之间的距离, θ 是入射光波波阵面法线与{111}面法线的夹角, n_{avg}^2 表示晶体的平均折介电常数,可以由下式计算:

$$n_{\text{avg}}^2 = f_1 n_1^2 + f_2 n_2^2, \quad (2)$$

其中: f_1, f_2 分别为胶体中微球和空气所占的体积百分比,对于由胶体微球组成的面心立方结构中,一般取为 74%和 26%, n_1, n_2 分别为胶体中微球和空气的介电常数。

光子晶体修饰光纤的原理是在光纤的端面制备胶体光子晶体,使光子晶体的<111>面平行于光纤端面;单模光纤作为导波介质,将光波引入到胶体光子晶体的表面,通过胶体光子晶体对光波的调制,形成具有明显带隙的透射波和在禁带频率的反射波^[13]。禁带的频率与构成光子晶体材料的介电常数及晶格的尺寸有关,通过选择不同的材料或者微球的尺寸,可以使禁带中心频率落在需要的位置。当光子晶体中填充介电常数不同的材料时,禁带中心频率会产生偏移。因为光纤截面模场分布主要在纤芯处直径为 $9\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ 的圆内,因此只要能够在纤芯处制备直径大于 $20\ \mu\text{m}$ 的高质量胶体晶体即可获得较好的透、反光谱。

3 实验

3.1 光纤端面制备 PS 胶体晶体

取一根光纤跳线剪断后,将剪断一端的光纤垂直切割并用丙酮、乙醇、去离子水清洗各 20 min,然后将光纤水平固定在烧杯中,使其端面在竖直平面内。如图 1 所示,光纤粘贴在平板玻璃上,平板玻璃竖直固定在溶液中。配置体积分数为 0.5%的聚苯乙烯水溶液 20 ml,聚苯乙烯分粒径为 690 nm,分散度为 5%。

配置的溶液经超声分散 20 min 后倒入固定有光纤的烧杯中, 并将烧杯置于 40 °C 的恒温水浴中, 2 h 后关闭水浴, 自然冷却 1 h 后取出光纤即可。观察光纤端面即有均匀淡绿色的光泽。

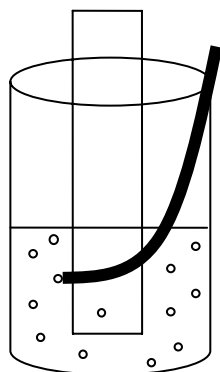


图 1 光纤端面生长胶体晶体的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the growth of colloidal crystals on the fiber end face

将光纤换成如图 2 所示的光纤-毛细管结构, 毛细管外径 1.8 mm, 内径 126 μm, 长 7 mm, 一端垂直切割, 一端有喇叭口。光纤从毛细管喇叭口插入后用胶水固定, 将毛细管另一端磨平, 使光纤端面和毛细管端面在同一平面内。用上述同样的方法在光纤-毛细管端面生长胶体晶体。

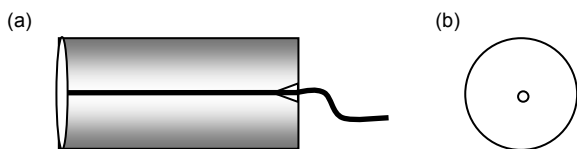


图 2 光纤-毛细管结构。(a) 光纤-毛细管侧面; (b) 光纤-毛细管正面(端面)

Fig. 2 Schematic diagram of fiber-capillary structure. (a) Side view; (b) Front view

3.2 光纤端面制备 SiO₂ 反蛋白石

采用垂直沉积法协同自组装填充有 SiO₂ 凝胶的 PS 胶体晶体模板。生长装置如图 1 所示。以去离子水为分散剂, 配置粒径为 580 nm 或者 390 nm, 体积分数为 0.15% 的 PS 微球胶体溶液, 并向其中加入正硅酸乙酯(tetraethyl orthosilicate, TEOS)酸性催化的水溶液(提前一小时配制搅拌, 质量比例为 98 wt% TEOS : 0.1 M/L HCl : 99.99 wt% EtOH=1:1:1.5), 添加正硅酸乙酯酸性催化的水溶液体积比为 PS 微球胶体溶液 : 正硅

酸乙酯水溶液=100:1, 超声分散 20 min, 将经过丙酮、乙醇、去离子水超声清洗并干燥的光纤、光纤-毛细管的端面垂直固定在溶液中, 将溶液置于 40 °C 的恒温水浴中, 随着溶液的蒸发, PS 微球自组装成胶体晶体在光纤和光纤毛细管端面, 同时 SiO₂ 的先驱体凝胶填充在微球的间隙中。此时得到复合胶体晶体。

将长有胶体晶体的光纤、光纤-毛细管置于马弗炉中均匀升温至 500 °C 烧结 2 h, 取出即可在光纤、光纤-毛细管端面得到 SiO₂ 的反蛋白石。

3.3 测试与表征

采用日本电子公司生产的 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察样品的形貌。用 1×2 的分路器得到其反射光谱。反射光谱测试光路如图 3 所示。其中白光源是 YOKOGAWA AQ4305, 光谱范围为 400 nm~1800 nm。光谱仪是 YOKOGAWA AQ6370, 光谱测量范围为 600 nm~1750 nm。测量时分辨率为 2 nm。分光器为 50% : 50% 平均分光。

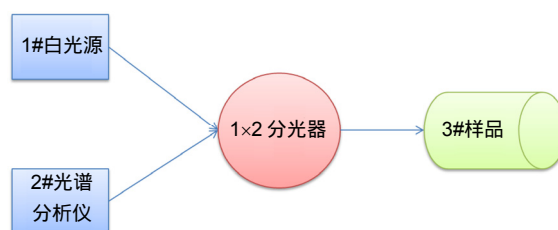


图 3 端面由胶体晶体修饰的光纤的反射光谱测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflection spectra measurement set up for colloidal crystal decorated optical fibers

4 结果与分析

4.1 光纤端面 PS 胶体晶体显微形貌观察和反射光谱分析

图 4(a)和图 4(b)分别为光纤端面胶体晶体整体和局部的 SEM 照片。从图 4(a)中可以看到, 光纤端面均匀生长有胶体晶体, 厚度较薄, 图 4(b)表明 PS 微球在平行于光纤端面的平面上是六方排列, 对应于面心立方的{111}面。图 4(c)和图 4(d)是光纤-毛细管端面的整体和局部 SEM 照片。图 4(c)是光纤-毛细管的截面,

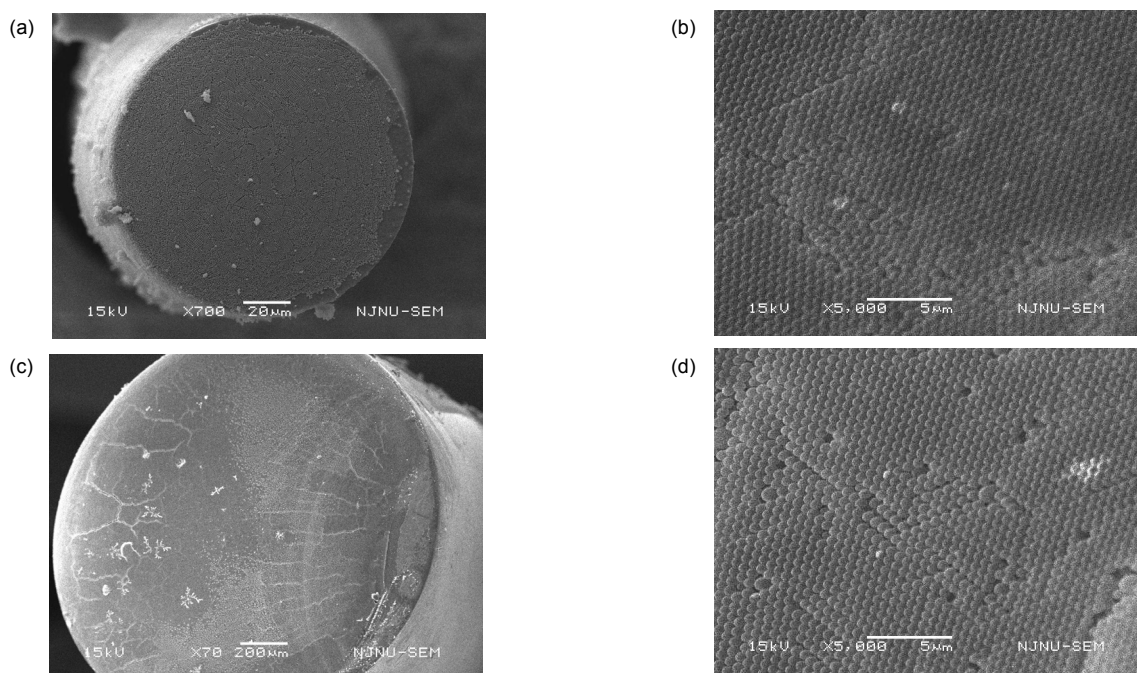


图 4 扫描电子显微镜下 PS 照片。(a)~(b) 光纤端面的 PS 胶体晶体 SEM 照片；(c)~(d) 光纤-毛细管端面的 PS 胶体晶体 SEM 照片

Fig. 4 SEM images of PS colloidal crystals. (a)~(b) SEM images of PS colloidal crystals on a single optical fiber end facet; (c)~(d) SEM images of PS colloidal crystals on a fiber-capillary structure end facet

其中心处是光纤的端面，图 4(d)是图 4(c)中光纤-毛细管端面中心处光纤端面胶体晶体的照片，从图 4(d)中可以看到 PS 微球在光纤端面排列整齐有序。

测量反射光谱的光路如图 3 所示，首先测量连接在 3#端口未生长胶体晶体单模光纤端面的出射光强 p_1 ，然后在 3#端口连接端面生长有胶体晶体的光纤，在 2#端口测量输出光功率 p_2 ，推导出 3#光纤端面处胶体晶体的反射耦合回光纤的光强，由下式计算：

$$p_3 = 2p_2 + p_{\text{loss}} \quad (3)$$

其中 p_{loss} 是法轮盘的插损。光从胶体晶体反射耦合回光纤的耦合效率暂未考虑，有待进一步研究。从而得到胶体晶体的反射光谱。如图 5 所示，分别是端面生长有胶体晶体的光纤和光纤-毛细管的反射光谱图。图中蓝线是光纤端面胶体晶体的反射谱，红线是光纤-毛细管端面胶体晶体的反射谱，两根光谱是在相同的实验参数下生长、测试获得的。从图中可以看到直接在光纤端面生长胶体晶体的反射峰位于 1562 nm，峰值半宽为 160 nm，峰值反射率为 14.9%；生长在光纤-毛细管端面的胶体晶体的反射峰位于 1556 nm，峰值半宽为 140 nm，峰值反射率为 31%。通过对比光纤和光纤-毛细管端面胶体晶体的反射光谱可看出，光纤-

毛细管的反射谱峰值反射率比光纤的要高 16.1%，峰值半宽小 20 nm。同时光纤-毛细管反射谱中低反射率区的 F-P 条纹说明胶体晶体的厚度均匀一致，通过 F-P 条纹计算得到光纤-毛细管端面胶体晶体的层数为 12 层，光纤端面为 3~4 层。因此在相同的实验参数下，在光纤-毛细管端面制备胶体晶体比直接在光纤端面制备胶体晶体有更好的光学特性。

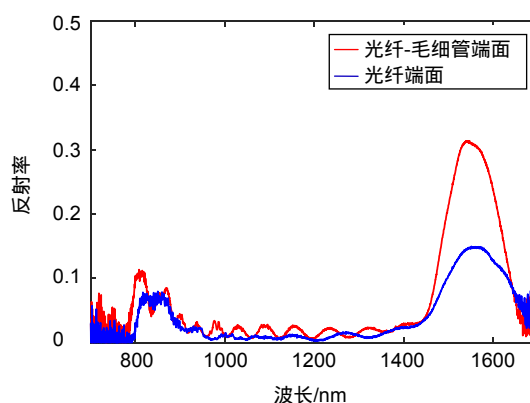


图 5 光纤和光纤-毛细管端面胶体晶体的反射光谱
Fig. 5 Reflection spectra of PS colloidal crystals prepared on single mode optical fiber (blue line) and fiber-capillary end facet (red line)

4.2 光纤端面 SiO₂ 反蛋白石的显微形貌分析

图 6 (a)和图 6 (b)是光纤端面的 SiO₂反蛋白石 SEM 照片。图 6(a)是整体图,其中的裂纹是烧结时产生的,因为光纤的端面很小,在光纤端面自组装时,光纤的中间较厚,四周较薄,烧结时内部应力不均匀引起裂缝。图 6(b)是光纤纤芯处的局部 SEM 图,图中可以看到空气孔呈六方密排形式,每个大孔内下方有对称的 3 个小孔与下层相连,空气孔形成面心立方结构,图 6(b)中即为面心立方的{111}面,通过分析可知,每个空气球内有 12 个小孔与周围 12 个空气球相连,底部 3 个与下层 3 个相邻的空气球相连。中间与周围 6 个相邻的空气孔相连,上部有 3 个孔与上层相邻的 3 个空气球相连。图 6(c)和图 6(d)是光纤-毛细管结构端面的 SiO₂反蛋白石 SEM 照片,图 6(c)为光纤-毛细管中

光纤端面的 SEM 照片,其中的裂纹明显比图 6(a)中要窄,有规则。图 6(d)为其纤芯处的 SEM 照片,其排列高度有序。通过 SEM 照片可知在光纤-毛细管端面制备的 SiO₂反蛋白石比直接在光纤端面制备的反蛋白石在裂纹大小、厚度的均匀性等方面有明显的改进。图 6(e)是复合胶体晶体覆盖单根完全光纤端面,图 6(f)是光纤端面局部放大图,图中 PS 微球半嵌在二氧化硅凝胶中。

4.3 相对湿度传感

图 7 为测试 390 nm 复合胶体晶体修饰的单根光纤的相对湿度响应特性。自制密闭空间中环境相对湿度从 12%依次增加到 97%,在 600 nm 处反射峰的强度随着相对湿度的增加而增加,890 nm 处的反射峰随着相

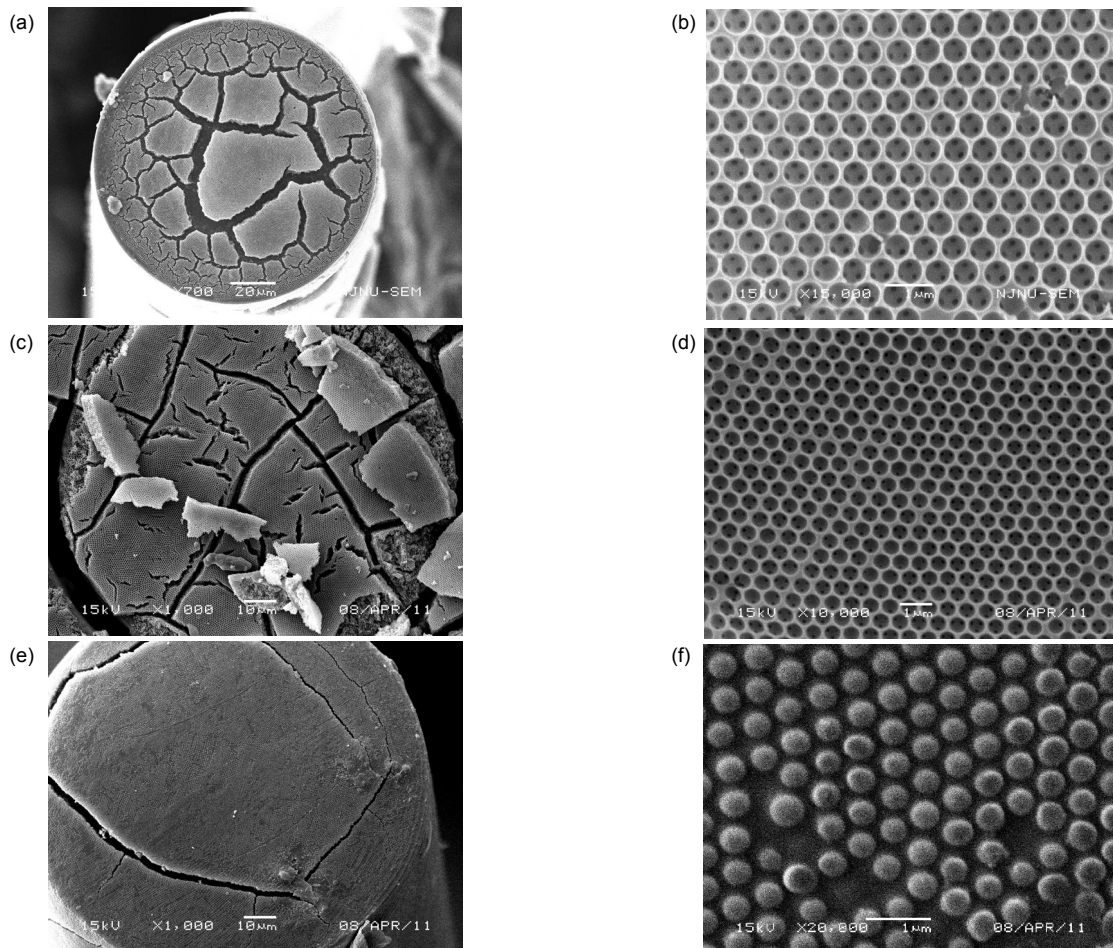


图 6 SiO₂反蛋白石 SEM 照片。(a)~(b) 光纤端面的 SiO₂反蛋白石 SEM 照片; (c)~(d) 光纤-毛细管端面的 SiO₂反蛋白石 SEM 照片; (e)~(f) 复合光子晶体修饰的光纤端面

Fig. 6 SEM images of SiO₂ Inverse Opal. (a)~(b) SEM images of SiO₂ Inverse Opal on a single optical fiber end facet; (c)~(d) SEM images of SiO₂ Inverse Opal on fiber-capillary structure; (e)~(f) SEM images of composite photonic crystals on a single optical fiber end facet

对湿度的增加,向长波长方向移动,在 12%~86%范围内近似线性增加 灵敏度为 0.133 nm 每相对湿度单位,可以选取 890 nm 处反射峰作为检测峰 相对湿度超过 86%以后,光谱没有明显偏移,原因是胶体晶体缝隙中填充的水份已经饱和。

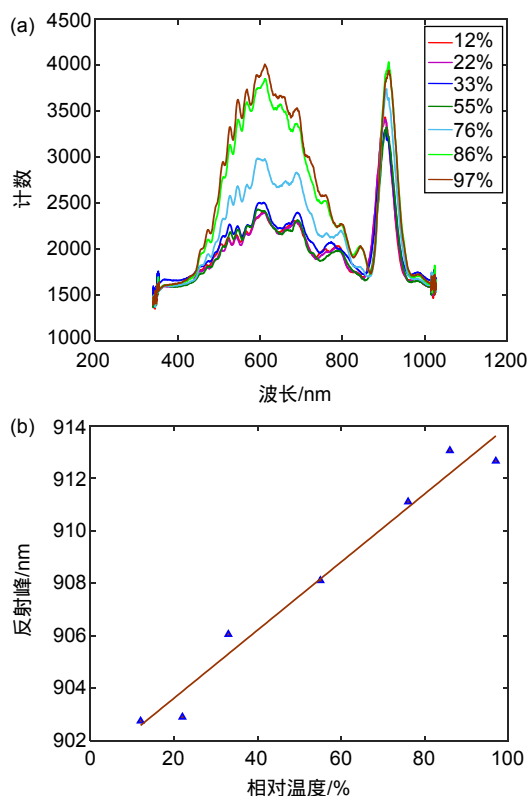


图 7 相对湿度检测。(a) 复合光子晶体在不同相对湿度下光纤端面的反射谱; (b) 反射峰和湿度的对应关系
Fig. 7 Relative humidity detection. (a) Reflection spectra of composite photonic crystals on fiber end facet in varied relative humidity; (b) Reflectance peak wavelength vs. relative humidity

5 结论

本文阐述了在光纤端面制备胶体光子晶体的理论,研究通过垂直沉积法在光纤端面制备 PS 胶体光子晶体、复合光子晶体及 SiO₂反蛋白石的技术,验证复合光子晶体的相对湿度传感特性。SEM 图片表明制备得到的反蛋白石具有较高质量,测得反射光谱有明显的反射峰。在光纤端面制备胶体光子晶体可以减小环境干扰,能够检测微弱的带隙信号,特别是对于复合胶体晶体这种反射峰强度较弱的情况。复合光子晶体修饰光纤形成光纤相对湿度传感器,相对湿度响应线性度好,形成的光纤相对湿度传感器体积小,适用于微小空间、电子设备敏感区域的相对湿度测量。设计了一种光纤-毛细管结构,这种结构提高了在光纤端

面得到的 PS 胶体晶体、复合胶体晶体及 SiO₂反蛋白石的质量,因此得到的光谱特性也明显提升。光纤端面制备胶体晶体能够应用于生化分析传感、宽带滤波等领域。

参考文献

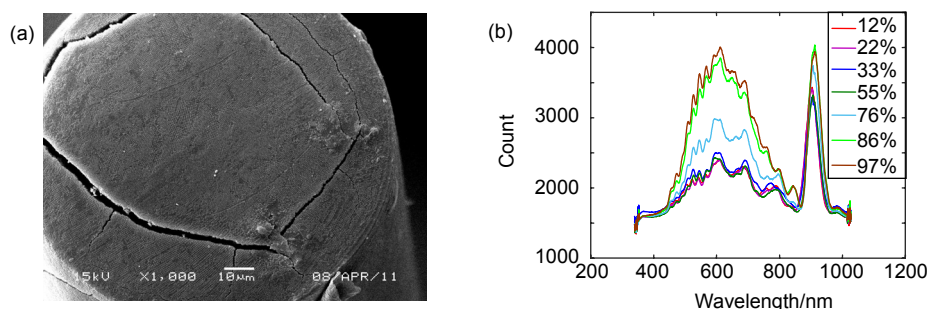
- [1] Guo W H, Wang M, Yu P, et al. Fabrication of 3D colloidal photonic crystals in cavity of optical fiber end face[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(5): 515–516.
- [2] Feng Pan F, Deng Y T, Ma X C, et al. Measurement of spatial refractive index distributions of fusion spliced optical fibers by digital holographic microtomography[J]. *Optics Communications*, 2017, **403**: 370–375.
- [3] Benjamin Hatton B, Mishchenko L, Davis S, et al. Assembly of large-area, highly ordered, crack-free inverse opal films[J]. *PNAS*, 2010, **107**(23): 10354–10359.
- [4] Anusha Ekbote A, Patil P S, Shivaraj R, et al. Structural, third-order optical nonlinearities and figures of merit of (E)-1-(3-substituted phenyl)-3-(4-fluorophenyl) prop-2-en-1-one under CW regime: New chalcone derivatives for optical limiting applications[J]. *Dyes and Pigments*, 2017, **139**: 720–729.
- [5] Chen C M, Xu J, Yao Y. Fabrication of miniaturized CSRR-loaded HMSIW humidity sensors with high sensitivity and ultra-low humidity hysteresis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, **256**: 1100–1106.
- [6] Gomez D, Morgan S P, Hayes-Gill B R, et al. Polymeric optical fibre sensor coated by SiO₂ nanoparticles for humidity sensing in the skin microenvironment[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, **254**: 887–895.
- [7] Bao L F, Dong X Y, Shen C Y. Interferometric optic fiber humidity sensors based on graphene oxides[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2018, **29**(1): 75–80.
- [8] 包立峰, 董新永, 沈常宇. 基于氧化石墨烯的干涉型光纤湿度传感器[J]. *中国计量大学学报*, 2018, **29**(1): 75–80.
- [9] Cheng J N. Mach-Zehnder interferometer based on fiber taper and fiber core mismatch for humidity sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(2): 024212.
- [10] 程君妮. 基于光纤锥和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉湿度传感器[J]. *物理学报*, 2018, **67**(2): 024212.
- [11] Shao M, Qiao X G, Fu H W, et al. Fiber humidity sensor based on fiber Bragg grating sandwiched in SMS fiber structure[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(9): 3008–3013.
- [12] 邵敏, 乔学光, 傅海威, 等. 光纤布拉格光栅嵌入 SMS 光纤结构的湿度传感器[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(9): 3008–3013.
- [13] Mendoza C, Gonzalez, Gordo E, et al. Protective nature of nano-TiN coatings shaped by EPD on Ti substrates[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, **38**(2): 495–900.
- [14] Zhou Z C, Zhao X S. Flow-controlled vertical deposition method for the fabrication of photonic crystals[J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2004, **20**(4): 1524–1526.
- [15] Wang S C, Xu S S, Wang Y M, et al. Synthesis, crystals of centrosymmetric triphenylamine chromophores bearing prodigious two-photon absorption cross-section and biological imaging[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, **173**: 871–879.
- [16] Pettinari G, Gerardino A, Businaro L, et al. A lithographic approach for quantum dot-photonic crystal nanocavity coupling in dilute nitrides[J]. *Microelectronic Engineering*, 2017, **174**: 16–19.

Colloidal photonic crystal modified optical fiber and relative humidity detection application

Pan Chao¹, Zhou Junping^{1,2}, Ni Haibin^{1,2*}

¹School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

²Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Signal Processing, Nanjing, Jiangsu 210044, China



Composite photonic crystal film produced on a single optical fiber end facet. (a) Relative humidity sensing properties of composite photonic crystals on an optical fiber end facet; (b) Reflectance spectra of composite photonic crystals

Overview: Photonic crystals have been widely used in sensing, information processing and optical devices since they can manipulate light in the wavelength scale by periodic refractive index distributions, which can also be called optical band gaps. In addition, optical fibers are flexible miniature optical waveguides. Therefore, the combination of photonic crystals and optical fibers could form a miniature sensing platform on fiber, named lab on fiber. In this paper, self-assembly method was applied to fabricated colloidal photonic crystals on optical fiber end facets. Polystyrene opal film, silica inverse opal film and composite opal film are successfully produced on a single optical fiber end facet. Film quality was characterized by SEM and reflection spectra through the other end of optical fiber. Cracks and limited layers of colloidal photonic crystals were observed on the single optical fiber end facet. To increase the photonic crystal film quality, an optimized structure, a capillary ferruled on one end of the fiber and a formed large flat surface, was employed in the fabrication process. As a result, high quality colloidal photonic crystal on the fiber end facet was obtained which is confirmed by optical reflection spectra. Moreover, the produce film stick more firmly on the fiber end facet compared to that on a single optical fiber. Principles of the colloidal photonic crystal film as sensing materials are discussed. Bragg reflection as well as effective refractive index theory was employed to describe the band gap shift of colloidal photonic crystal. A relatively large effective refractive index change or large lattice distance, or both of them will results in a large sensitivity of the colloidal photonic crystal.

Composite photonic crystal on fiber end facet as relative humidity sensor are demonstrated. The sensing mechanism is that silica gel infiltrated in polystyrene spheres can absorb water molecular in high relative humidity, and the water in the silica gel network will evaporate when relative humidity decrease. As a result, the fabricated composite photonic crystal film is sensitive to relative humidity in a range from 12%~86%. A sensitivity of 0.133 nm for reflectance peak at 900 nm wavelength is experimentally demonstrated. When the relative humidity is larger than 86%, reflectance peak of the composite photonic crystal film does not shift obviously due to a saturated absorption of water of the silica gel. As a conclusion, colloidal photonic crystal on optical fiber end facet can be fabricated and could form a platform for optical sensing or analyzing.

Citation: Pan C, Zhou J P, Ni H B. Colloidal photonic crystal modified optical fiber and relative humidity detection application[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180168

Supported by National Natural Science Foundation of China (61605082), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20160969), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (16KJB510020), the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2017M611654), Jiangsu Postdoctoral Science Foundation Funded Project (1701074B), the Startup Foundation for Introducing Talent of NUIST (2015r040), and Open Project of Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing (KDXS1506)

* E-mail: nihaibin@nuist.edu.cn