

基于液体填充微结构光纤的新型光子功能器件

姚建铨^{1,2} 王 然^{1,2} 苗银萍^{1,2,3} 陆 颖^{1,2} 赵晓蕾^{1,2} 景 磊^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072

²天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

³天津理工大学电子信息工程学院 天津薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384

摘要 基于液体材料填充的微结构光纤光子器件有效地将功能材料在不同外界物理场作用下的物理效应同光纤自身的微纳结构结合起来, 具有可调谐、设计灵活、全光纤结构和易于集成等优点, 是未来光纤光子器件发展的重要方向。掌握不同填充材料、填充方法及所制作器件的不同特性、功能和应用对这一领域的研究具有重要的指导意义。综合阐述了近年来基于液体材料填充的微结构光纤光子器件的研究进展, 分析和归纳了各种液态功能材料的种类、物理特性及填充方法, 系统阐述了基于该方法实现的光开关及衰减器、滤波器、调制器、色散补偿器等可调谐光纤光子器件及光纤传感器件, 最后对该领域未来的发展方向和前景进行了展望, 为未来新型光纤光子器件的研制提供必要的依据和参考。

关键词 光学器件; 微结构光纤; 液体填充; 光纤传感器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0101002

Novel Photonic Functional Devices Based on Liquid-Filling Microstructured Optical Fibers

Yao Jianquan^{1,2} Wang Ran^{1,2} Miao Yinping^{1,2,3} Lu Ying^{1,2} Zhao Xiaolei^{1,2} Jing Lei^{1,2}

¹ College of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Institute of Laser & Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³ School of Electronics Information Engineering, Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Device, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract The functional devices based on the microstructured optical fiber infiltrated with liquids effectively combine the micro/nano structure with the physical effect of materials under different external fields. They provide a promising platform for novel photonic devices with the advantages of tunability, flexibility in design, all-in-fiber structure and integration. In this paper, the recent research statue of the liquid-filling microstructured optical fiber devices, such as optical switches/attenuators, filters, modulators and dispersion compensators, as well as optical fiber sensors, is reviewed. At the same time, the variety and physical characteristics of functional materials and the filling methods, which are the focus for future research in this area, are analysed. Finally, some prospects are given for the reference and research in the future.

Key words optical devices; microstructured optical fiber; liquid infiltration; optical fiber sensors

OCIS codes 060.5295; 230.1150; 060.2370

1 引 言

现代高速通信系统的迅猛发展对全光通信技术

提出了更高的要求, 全光通信技术的实现依赖于光子器件(如光开关、衰减器、滤波器、调制器、波分复

收稿日期: 2012-07-30; **收到修改稿日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家“973”计划(2010CB327801)、国家自然科学基金(11204212)和中国博士后科学基金(2012M520024)资助课题。

作者简介: 姚建铨(1939—), 男, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光、光电子、非线性光学和太赫兹技术等方面的研究。E-mail: jqyao1939129@yahoo.com.cn

用器等)和通信系统技术的不断更新。为此,相关领域的科研人员不断从新机理、新材料、新结构和新思路等角度出发探索新型的光子器件,使其在性能和功能方面得到显著的改进和提高^[1]。就其本质而言,新型光纤光子器件的根本问题在于如何将功能材料的物理效应(如热光、电光、磁光、声光及非线性效应等)与光纤中的微纳结构结合起来,通过控制模式耦合和带隙调谐,达到操控光子在微纳尺度光波导中运动与传输的目的,从而实现新型的全光纤光子功能器件。

微结构光纤(MOF)的出现为实现新型光子器件提供了很好的研究平台。微结构光纤,又称为光子晶体光纤(PCF)或多孔光纤^[2,3],通常以纯石英或聚合物材料为基底,其横截面为按一定规则轴向排列的空气孔,通过在中心位置引入缺陷或者不同结构来形成纤芯。根据导光机理的不同,MOF可分为全内反射型(TIR)^[4]和光子带隙型(PBG)^[5]两种。鉴于其新颖的导光机理和灵活的结构设计,MOF相对于普通光纤展示出很多新奇的性质^[6~10],目前已经广泛应用于光通信^[11,12]、高功率光纤激光器及放大器^[13]、超连续光源的产生^[14,15]及光纤传感^[16~19]等诸多领域。

微结构光纤中的空气孔可以看成一系列微流体反应器,为功能材料的填充提供了良好的空间和自由度。当微孔中填充功能材料时,材料与光的相互作用直接表现为光纤导光特性的改变,因此通过对MOF传导特性的分析,可以得到光纤中介质与光相互作用的大量信息。该方法保持光纤几何参数不变,既不需要重新设计结构,也不需要增加拉制难度。通过填充具有热光、电光、磁光、声光及非线性等特性的功能材料,采取施加外界物理场的方式改变其物理效应,从而实现对微结构光纤带隙特性、模式耦合特性和传导特性的调谐和控制,进而实现基于热、电、磁、光、声等外场操控下的可调谐的新型全光纤光子器件。该方案能够将MOF灵活的端面结构设计、填充材料种类的选择和填充方法的多样性等结合到一起,使得所制作的器件具有更强的自由度和适应性,并且可以实现全光纤结构,更加有利于系统的集成。2001年,Eggleton等^[20]首次进行了这方面的实验研究,将一种丙烯酸盐的单体混合物填充到纤芯写有长周期光栅的全反射MOF中,制成了可调光纤滤波器。随后,各种基于液体功能材料的MOF光子器件纷纷涌现出来。

填充功能材料的物理特性、载入方式及调制手

段会对微结构光纤的导光机制产生深刻的影响,从而可以实现具有不同功能的光纤光子器件。从上述研究背景出发,本文分析和归纳了当前用于填充MOF的各种液态功能材料及其物理特性,并总结了各种填充方法。在此基础上,综合阐述了近年来基于液体材料填充的MOF可调谐光子器件和光纤传感器的种类、特点和用途,并对该领域未来的发展方向和趋势进行了展望,为基于液体填充的MOF光子器件的研究和应用提供必要的依据和参考。

2 填充液体的种类及物理特性

对MOF而言,所填充的液体材料应该具有在光纤传输波段吸收系数小、与光纤基底材料亲和、易于填充、折射率在外场作用下可调谐等特点。根据与外场作用机制的不同,可以将填充物质分为热光、电光、磁光、声光等材料,较为常见的有折射率温度敏感液体、聚合物、液晶、磁流体溶液、金属纳米颗粒及纳米线溶液、量子点溶液等。它们对温度、电场、磁场等外界参量较为敏感,这样,既可以通过改变外界物理场的方法对所填充的微结构光纤的导光特性进行控制,实现可调谐的光纤光子器件,又可以通过探测其光谱参数的变化推测外界物理场的变化,从而研制出相应的传感器件。

具有热光效应的液体材料主要包括甲苯、氯仿、乙醇等常见液体^[21]及折射率匹配液等,其折射率-温度敏感系数在 10^{-4} K^{-1} 数量级,远大于光纤基底材料的温度敏感系数(10^{-6} K^{-1});聚合物材料同样具有温度可调谐折射率的特性^[22],然而,由于其在聚合化学反应过程中产生的应力和断裂现象,聚合物填充器件不易获得良好的光学性质^[23]。温度敏感液体材料的添加可以有效提高MOF的温度敏感性或者可调谐特性,从而获得热敏器件。此外,将高折射率液体或聚合物材料填充入MOF包层空气孔后,可以改变其传导机制,形成类似全固光子带隙型光纤,通过热光效应调谐MOF的带隙和导光特性。

液晶材料以其独特的电场和温度调谐特性,近年来被广泛应用于微结构光纤光子器件之中。液晶分子具有很强的光学各向异性,可视为单轴晶体,通过施加外加电场的方式实现对分子取向的控制,从而改变其折射率。与此同时,液晶材料的折射率还会受到温度的影响,在清亮点温度附近处于相变状态,各向异性消失,折射率呈现各向同性分布。因此,填充液晶的MOF可以用于制作性能优良的电场和温度调谐器件^[24,25]。

随着纳米技术和材料科学的发展,以 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒溶液为代表的磁性液体得以广泛应用。该种溶液既具有液体材料的流动性,又具有固体材料的强磁性和丰富的磁光特性,并且具有较高的温度敏感特性(折射率-温度敏感系数在 10^{-4} K^{-1} 数量级),光场作用下具有灵活多变的微结构及优异的光学可调谐特性,因此,该种材料在温度场、磁场及电场等调谐下的功能器件或传感器的制作方面具有很大的应用潜力^[26,27]。

填充金、银等金属纳米颗粒及纳米线溶液,可以用于产生表面等离子体共振(SPR)现象^[28],以及表面增强拉曼散射(SERS)效应^[29],可以用于制作高灵敏度 MOF 传感器。

量子点^[30]是一种新型的有源材料,可以作为激光工作介质使用^[31],在适当的抽运光作用下可以制成光纤放大器或者光纤激光器。该材料的引入使得不需要控制特殊的光纤,仅仅通过填充不同种类和尺度的量子点材料就可以实现不同波段、不同功能的光纤放大器或者激光器,从而为研制新颖、高效的有源光纤器件开辟更大的发展空间^[32]。

3 填充方法

微结构光纤的空气孔直径一般为微米量级,确定一套稳定而有效的液体填充技术是研究基于液体填充 MOF 光子器件首先需要解决的问题。目前的填充方法主要包括完全填充和选择性填充两种。前者完全填充 MOF 整个端面上的全部空气孔,主要采用毛细吸收法和压力差填充法,如图 1 所示。后

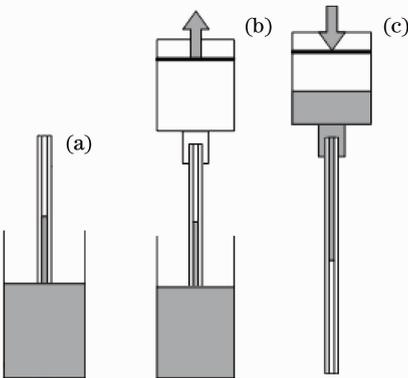


图 1 完全填充方法示意图。(a)毛细吸收法;
(b)低压抽入法;(c)加压注入法

Fig. 1 Schematic diagrams of completely liquid-filling methods. (a) Capillary filling method; (b) decompression pumping method; (c) pressurization injection method

者针对 MOF 截面上的某几个特定的空气孔进行选择性的填充,主要包括多次截断填充法,电弧放电塌陷空气孔法和直接选择填充法。

3.1 完全填充方法

1) 毛细吸收法

毛细吸收法是最简单和常用的液体填充方法,将端面切割平整的微结构光纤插入待填充液体中,靠空气的毛细现象将液体吸入光纤。Nielsen 等^[33]对该种方法做了详细的理论研究,通过建立物理模型,考虑了毛细力、摩擦力、外界压力和液柱本身重力等 4 个因素得到填充时间 t 与填充长度 L 的函数关系,从而为利用时间估计填充长度提供了理论依据。忽略重力项得到解析解为

$$L(t) = \left[\frac{A}{B^2} \exp(-Bt) + \frac{At}{B} - \frac{A}{B^2} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中,常数 $A = \frac{4\sigma \cos \theta + 2\Delta Pa}{\rho a}$, $B = \frac{8\mu}{\rho a^2}$,其中 σ 为液体表面张力, θ 为液体与光纤壁面的接触角度, ρ 为液体密度, μ 为液体动态粘性系数, a 为光纤空气孔半径, ΔP 为光纤外部液体与内部液体的压强差。毛细现象填充方法操作简单,但填充长度有限,速度较慢。

2) 压力差填充法

除毛细填充法之外,在光纤两端面之间制造压力差可以增加抽液速度,加压注入和低压抽入法是压力差填充法所采取的常用方法。压力差可以通过对光纤一端加压或对某一端减压实现,注射器和真空泵都可以提供所需要的压力差。与毛细现象相比,压力差填充法提高了填充速度和可填充长度,克服了粘稠度较大的液体无法进行填充的难题,并可以通过控制压力差来调节填充速度。但该方法需要装置更稳定、密封性好,且抽液速度不能过快,防止由于抽液过程中产生气泡而发生液柱填充不连续的现象。

3.2 选择填充方法

选择性填充是 MOF 重要的填充手段之一,该方法进一步提高了器件制作方面的灵活性,极大地拓宽了光器件的应用范围^[34]。一般而言,选择性填充主要包括两个过程:1) 采取适当方法封堵不需要填充的 MOF 空气孔;2) 利用传统的填充方法对未进行封堵的空气孔进行填充。

1) 轴向分步填充截断法

根据(1)式,由于填充速度与 MOF 空气孔的尺寸相关,对于具有尺度不同空气孔的光纤,可以通过

轴向分步填充和截断的方法实现对大孔或者小孔的选择性填充。2004年, Huang等^[35]详细报道了选择填充光子带隙光纤中较大直径空气孔的实验步骤, 如图2所示。利用毛细现象中液体在不同直径

的空气孔中上升高度的不同, 采用三次切割和两次填充的方法, 在MOF中心大空气孔中成功填充了掺有染料的紫外(UV)固化聚合物, 实验上观察到双光子荧光现象。

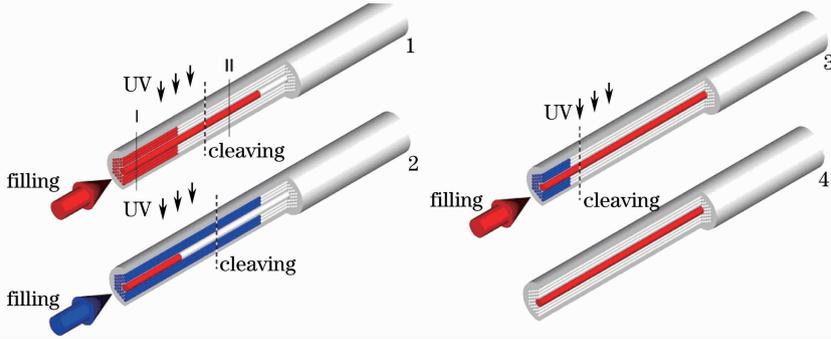


图2 轴向分步填充截断法选择性填充微结构光纤中心空气孔

Fig. 2 Selective filling of the central airhole of MOF with axial multistep injection-cure-cleave process

2) 熔接机电弧放电塌陷空气孔方法

利用熔接机对MOF进行熔接时, 电弧放电的能量会使得MOF包层空气孔出现不同程度的塌陷。光纤空气孔大小不一, 其塌陷速度也不同, 通过合理地选择放电参数和光纤摆放位置可以实现对MOF空气孔的选择性塌陷, 进而实现选择性填充^[36]。

上述选择性填充方法所适用的MOF具有一个共同的特点, 即光纤的空气孔大小具有明显差距, 只能在尺寸差异较大的空气孔之间实现选择性填充。因此上述填充方法在一定程度上适用范围较小, 填充方案也比较有限。

此外, 利用光纤打孔及熔接机错位熔接的方法也可以实现部分空气孔选择性填充。2010年, Wang等^[37]采用飞秒激光技术结合精密显微系统在LMA-10光纤上打出55 μm深的沟槽, 将部分空气

孔暴露出来, 再通过毛细现象进行选择填充, 从而实现弯曲不敏感带隙调谐型微结构光纤。2011年, Qian等^[38]利用熔接机错位熔接的方法选择性封堵了MOF部分空气孔, 成功制作了基于部分填充的MOF偏振器件, 偏振消光比达到18 dB。

3) 直接选择填充法

目前, 结合成熟的显微技术和精密机械控制技术, 可以实现MOF任意空气孔的直接选择性填充^[23]。利用显微镜精确控制精密调整架上探针的移动, 将紫外敏感胶水填入MOF端面不需要填充的空气孔中, 随后利用紫外光曝光固化紫外胶水, 从而实现对未封堵的MOF空气孔的选择性填充。与此同时, 也可以采用三维飞秒激光直接写入技术^[39~41]或聚焦离子束方法^[42]实现任意空气孔的选择性填充。直接选择填充法效果如图3所示^[41]。

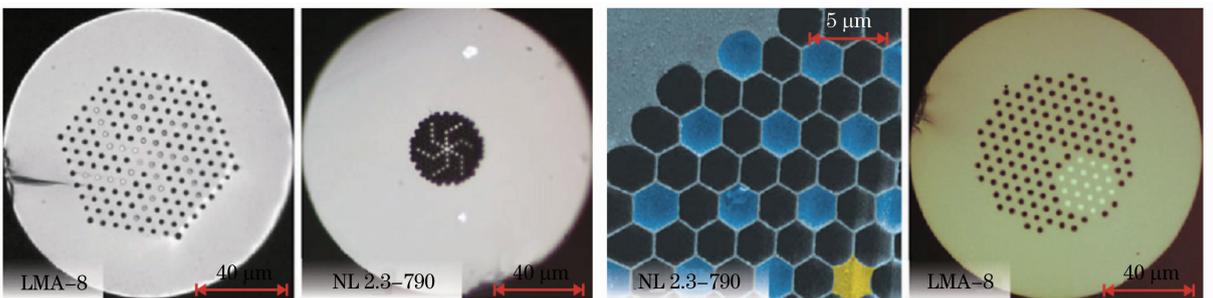


图3 直接选择填充法效果图

Fig. 3 Cross section of direct selective filling method

在填充过程中, 由于MOF空气孔一般在微米尺度, 很难通过肉眼直接观察, 为了能定量分析填充长度和填充速度, 可以采用高分辨率显微镜结合数

字相机从端面和侧面观察MOF的填充情况; 或者在填充液体中加入罗丹明等荧光染料^[35], 在特定波长下激发荧光, 以观察液体填充的位置; 也可以将

He-Ne 激光器射出的光束经透镜会聚在 MOF 上, 利用填充后 He-Ne 激光衍射条纹的变化判断液体在光纤内的位置^[23]; 对于填充高折射率液体的 MOF, 其透射光谱会产生一系列特征带隙, 利用填充液体折射率对外界温度敏感的特性, 以热探针接近 MOF, 当光纤透射谱上的带隙发生漂移时, 可以断定热探针已经靠近被填充的液柱位置, 从而确定填充状况。

4 光纤光子器件及应用

目前, 高速光传输及通信系统具备太比特每秒的数据传输能力, 对各种可调谐光器件的要求日益提升。液态功能材料在不同外界物理场作用下的物理效应(例如热光、电光、磁光、声光等效应)与微结构光纤结构多样、设计灵活等特点的有机结合, 为新型光子器件的设计提供了更大的发展空间。近年来, 伴随着具有外场调谐下优异光学性能材料的不断涌现和填充工艺的日益成熟, 大量可调谐的光子器件及光纤传感器件纷纷涌现出来。

4.1 可调谐光子器件

通过向 MOF 空气孔中填充对外场敏感的液体功能材料, 采用改变外界温度、电场、磁场、光场等手段对所填充的 MOF 的模式耦合和带隙调谐特性进行控制, 从而实现新型可调谐全光纤光子功能器件, 如光开关及衰减器、滤波器、调制器及色散补偿器等。

1) 光开关及衰减器

在 MOF 空气孔中填充温度或电场敏感材料, 通过外场调谐下光纤导光机理的改变或带隙的漂移, 可以得到某一特定波段传导光损耗特性的调节, 从而实现外场控制下的光开关功能。2001 年, Kerbage 等^[43]利用拉锥后的柚子型微结构光纤, 填充折射率温度敏感的聚合物材料, 通过温度变化引起光纤导光机理由全内反射型向带隙型转变, 从而实现了动态范围为 30 dB, 插入损耗为 0.8 dB, 并且具有最小偏振依赖特性的光开关。2003 年, Larsen 等^[44]首次提出液晶填充 MOF, 通过电流控制温度变化引起液晶折射率的改变, 进而引起带隙变化, 实现了可调谐滤波功能及低压控制宽带光开关, 在 976 nm 附近 0.4 °C 的温度范围实现了开关的通断转换, 消光比达到 60 dB, 插入损耗小于 1 dB。2004 年, Du 等^[45]在空芯光子带隙型光纤的纤芯处填充高折射率丝状液晶, 使得带隙型光纤转化成为传统的折射率导引型光纤, 利用外部电场电压控制纤芯

中液晶的导光特性, 实现电控光开关功能。在 He-Ne 激光波长 632.8 nm 处获得了 30 dB 的消光比。2006 年, Lægsgaard 等^[46]数值模拟了不同微结构光纤结构填充液晶作为热光开关的效果。结果表明, 工作于长波长带隙边缘的光开关可以产生更为优越的温度敏感特性, 而且大的孔径尺寸可以产生更好的开关效应。2009 年, Wang 等^[47]采用 MOF 空气孔填充温度敏感液体结合 Bragg 光栅的方法实现温度控制光开关, 消光比达到 33 dB, 工作波长位于 Bragg 波长附近较窄的范围, 温度跳变范围为 ± 5 °C。2010 年, Wang 等^[48]采用液体填充固芯 MOF 实现光开关。利用所填充的液体的热光效应引起包层折射率变化, 从而影响光纤模场分布, 使得入射的宽光谱产生选择性吸收, 以实现光开关功能, 其消光比达到 30 dB, 光开关温度跃变范围为 ± 10 °C。同年, Wang 等^[49]将折射率匹配液填充入 LMA-10 光纤, 通过温度控制光纤导光机理的转变, 得到消光比为 30 dB, 温度跃变范围为 10 °C 的光开关或衰减装置。

此外, 利用 MOF 中非线性效应也可以制作全光开关。2012 年, Vieweg 等^[50]在 LMA-8 光纤中选择性填充两个 2.9 cm 长的 CCl₄ 液柱, 利用超快非线性克尔效应, 通过温度影响两个液柱模之间的非线性耦合实现光开关功能, 其响应时间小于 1 ps 量级。

2) 滤波器

MOF 空气孔中填充高折射率液体材料形成带隙型光纤, 通过外界物理场调节带隙的变化, 实现对特定波长光信号透射率的调谐, 从而制作全光纤滤波器。1999 年, Abramov 等^[51]报道了一种新型光纤电场调谐滤波器, 通过在长周期光纤光栅中填充温度敏感聚合物材料, 利用电流热效应调谐长周期光栅吸收峰的偏移, 调谐范围约为 60 nm, 调谐效率达到 320 nm/W。2005 年, Steinvurzel 等^[52]将高折射率液体填充入带隙型 MOF, 并向填充部分分段施加不同温度, 导致光纤轴向各段形成不同的带隙效果。这些带隙的交叠形成了中心波长和带宽温度敏感的带通可调谐滤波器。此后, Scolari 等^[53]采用液晶填充拉锥带隙型 MOF 的方法, 实现了一种温度可调谐高斯型带通滤波器, 中心波长为 1062 nm, 3 dB 带宽为 150 nm。2008 年, Du 等^[54]详细研究了液晶填充 MOF 的温度特性, 在光子带隙边缘实现了超过 45 dB 的消光比, 并结合 Sagnac 干涉仪成功研制了电场可调谐滤波器, 在 1550 nm 波段实现了

27 dB 的干涉滤波输出,调谐范围超过 40 nm。2011 年, Miao 等^[27] 在固芯 MOF 包层空气孔中填充 Fe_3O_4 纳米颗粒溶液,采用超连续光源入射,实验测量了该装置在不同温度下的光谱响应特性。结果表明,透射光能量及透射光谱在长波长边缘处具有较高的温度敏感特性,该种器件可以应用于强度调制型传感器和可调谐全光纤增益均衡滤波器。

3) 调制器

功能材料在外界物理场作用下折射率的变化会影响 MOF 中传导光信号的振幅或相位,从而实现光调制器功能。2004 年, Alkeskjold 等^[55] 在 MOF 空气孔中填充掺有染料的丝状液晶,在 532 nm 光照条件下呈现出不同的排布,使得光子带隙发生变化,从而形成了受光场调谐的光纤调制器。2008 年, Hsiao 等^[56] 在此基础上报道了一种相似的光控全光纤调制器,通过填充光敏液晶的微结构光纤,在 632 nm 的 He-Ne 激光照射下实现了 10 dB 的调制范围和 1 s 量级的响应时间。近年来,部分学者开展了对 MOF 中填充磁流体的研究,2011 年, Zu 等^[57] 报道了基于磁性液体和 Sagnac 干涉仪的磁光调制器的研究,将磁性液体以薄膜形式插入 Sagnac 干涉环中,利用磁致双折射特性,显著提高了所设计调制器的消光比。2012 年, Yang 等^[58] 自行设计并拉制了具有悬挂式纤芯的空芯微结构光纤,填充 Fe_3O_4 纳米颗粒溶液实现了全光纤磁场调制器。以 He-Ne 激光器 632.8 nm 为入射波长,外磁场强度提高到 4890e(10e \approx 79.6 A/m)时达到 43% 的饱和调制深度,响应时间小于 120 ms。

4) 色散补偿器

利用外场对功能材料折射率的调节同样可以改变 MOF 纤芯或包层的等效折射率,进而实现对光波导色散特性的控制。2005 年, Sharkawy 等^[59] 通过向低折射率微结构光纤中填充微流体从而控制微结构光纤的色散特性;2008 年, Yu 等^[60] 采用选择性液体填充双芯 MOF,在 1.55 μm 波长处理论设计了具有高负色散值 $D = -19000 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的色散补偿器件,通过改变 MOF 几何参数和填充液体的折射率实现色散系数的调谐;2012 年, Hsu 等^[61] 采用液体填充双芯 MOF 的方法设计了具有超大负色散系数的色散补偿光纤,在 1.55 μm 处实现了 $D = -40400 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的负色散系数。

4.2 光纤传感器

微结构光纤凭借其独特的导光原理和优良的光学特性,被广泛应用于光纤传感系统当中。MOF 的

空气孔结构类似于光学微腔,因而成为研究化学、生物成分的良好载体。填充入 MOF 的功能材料,一般具有对外界物理参量敏感的光学性质,可以影响光纤的光谱参数,从而为新型 MOF 传感器的研究提供有效的途径。MOF 应用于传感领域的优势在于:光纤将光束束缚在一个狭小的区域内,为光与物质的充分作用提供了良好的场所;可以实现危险样品的在线、实时、连续监测,避免人员暴露于危险环境中;MOF 空气孔只有微米量级,使得使用极少量的样品即可满足检测需求;MOF 传感器可以盘绕成很长的检测样品池,具有作用距离长、模体积小等优点,可以显著增加灵敏度;可以利用丰富的光谱信息进行不同波段的生物医学传感;MOF 具有扩展成多维阵列的潜力,结合时分复用、波分复用等技术可以有效组成传感网络。

液体填充 MOF 主要通过外场的变化影响光纤导光或带隙特性及光纤纤芯-包层传输模式与液柱模式之间的耦合制造高灵敏度的外界物理场或折射率传感器。2007 年, Czaplá 等^[62] 将液晶填充入 MOF,利用光子带隙的移动测量了外部环境的温度、电场和压力等物理量的变化。2009 年, Wu 等^[63] 提出了基于谐振耦合原理的高灵敏度折射率传感器,在 MOF 中选择性填充了一个空气孔作为定向耦合器,通过纤芯模式耦合到包层缺陷导致的损耗峰来实现传感,灵敏度高达 30100 nm/RIU。2010 年, Han 等^[64] 在弯曲可控的 MOF 中心填充液体,通过控制填充的 MOF 的弯曲半径,实现光纤基模和包层模式之间的共振耦合,利用这种现象避免了温度和应力交叉敏感效应,获得了 32400 nm/RIU 或 13.1 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 的高温传感灵敏度。2011 年, Lee 等^[65] 通过在阶跃型光纤中开辟一个平行于纤芯的微流道空气孔制作微流体或折射率传感器。微流道内填充高折射率液体,从而在相位匹配条件下引起透射光谱尖锐的吸收峰,该吸收峰对液柱折射率的变化非常敏感。

相对于其他传感器而言,强度调制型 MOF 传感器具有结构简单、造价低廉、使用方便等优点。2009 年至 2010 年,李学金等^[66,67] 在 TIR 型微结构光纤内填充乙醇溶液,利用温度调制包层有效折射率的变化控制微结构光纤的损耗特性,进而影响其输出光强,对于 10 cm 的微结构光纤,温度灵敏度可达 0.315 dB/ $^{\circ}\text{C}$,并且可以通过提高微结构光纤的占空比、增加光纤长度和增大入射光波长的方法进一步提高传感灵敏度。此外,采用甲苯、氯仿、乙醇

等混合溶液填充的方法,根据实际需要调整混合溶液的配比可以调整传感器的工作温度范围。2008年,Xu等^[68]在空心填充液体的强度型光纤温度传感器中填充甲苯和氯仿混合液体,实现了5 dB/K的调制灵敏度,测量温度范围在20℃~60℃之间。2011年,王若琪等^[69]采用类似的方法,向LMA-8光纤中填充4 mm氯仿和乙醇的混合溶液,实验获得0.75 dB/℃的传感灵敏度。

与此同时,结合金、银等金属纳米颗粒及纳米线填充和镀膜技术,可以有效实现表面等离子体和拉曼传感器。2006年,Hassani等^[70]率先提出基于MOF的表面等离子共振传感器,由MOF基模光信号激发镀膜微孔内壁上的等离子体,大尺寸包层气孔为微流体样品提供通道,得到了 10^{-4} RIU的检测灵敏度;2007年,Gauvreau等^[71]在Bragg光纤外表面镀金膜,利用光子带隙型光纤表面等离子体检测低折射率物质,实现了 10^{-5} RIU量级的检测灵敏度;2010年,Yu等^[72]提出选择性镀膜MOF表面等离子体共振传感器,得到了更为狭窄的共振谱峰,从而提高了分辨率和信噪比,获得了 10^{-6} RIU的灵敏度。2006年,Yan等^[73]首次实现了基于空芯MOF的表面增强拉曼散射探针,在MOF内表面涂有金纳米颗粒作为SERS的基底,用 10^{-5} mol的罗丹明B(RhB)溶液作为待测样品检测空芯微结构光纤SERS传感器的性能。Zhang等^[74]于2007年首次报道了一种液芯微结构光纤SERS探针,利用高温火焰将空芯MOF的包层空气孔融化密封,然后将银纳米颗粒和被测样品吸入中心空气孔中,实现了对 10^{-5} mol的罗丹明6GC(R6G)的探测。Peacock等^[75]于2008年利用高压化学沉积方法在MOF内壁沉积一层银纳米颗粒作为SERS基底,实现了对浓度为 5×10^{-4} mol/L的腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)物质的探测。2010年,Yang等^[76]设计了一种基于SERS的高灵敏度的中空芯MOF分子传感器,利用银纳米颗粒胶体作为表面增强受激拉曼散射衬底,采用液芯探针测量R6G,最低检测浓度达到 10^{-10} mol/L,灵敏度提高了100倍。

此外,液体填充MOF与微结构光纤光栅相结合,可以制成灵敏度高,探测极限小的传感器^[77~79];将填充液体的MOF结合成熟的光纤干涉仪结构,制成MOF干涉性传感器^[80],也可以实现对外场的高灵敏度传感。2011年,Qian等^[81]报道将填充乙醇的微结构光纤接入Sagnac环境中,大大提高了干涉条纹的温度敏感系数,实现了高达6.6 nm/℃的温度

传感灵敏度。

5 本课题组的研究进展

近年来,天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所承担了国家重大基础研究项目(973)子课题:新型光子晶体光纤传感器的基础研究(2010CB327801),在基于液体填充MOF的新型光子功能器件研究领域开展相关工作,取得了一系列成果。主要从填充温度敏感混合液体、液晶、磁流体纳米颗粒溶液以及表面等离子体共振效应、表面增强拉曼效应等方面对MOF传感器及功能器件展开研究。

在填充温度敏感混合液体方面,向LMA-8型实心光子晶体光纤空气孔中填充氯仿和乙醇等热敏液体的混合物,实现了高灵敏度光子晶体光纤温度传感器。结果表明,对于填充液体的长度为4 mm的光子晶体光纤温度传感器,其传感灵敏度为0.75 dB/℃,实验结果和理论仿真相符合,并可以通过改变混合配比的方式优化传感灵敏度和温度敏感范围。该种传感器易于解调,灵敏度高,可以应用于分布式传感测量^[69]。此外,向自行设计的大占空比折射率导引型光子晶体光纤中填充温敏混合液体,理论设计了一种强度调制型可调谐热敏光开关。利用包层有效折射率的变化实现开关功能。理论计算表明,这种光开关可以在2℃的窄温度范围内实现通-断跳变,并可以根据混合液体配比比例的不同调节其温度通-断跃变点。这种光开关在全光通信和光计算中具有广泛的应用前景^[82]。

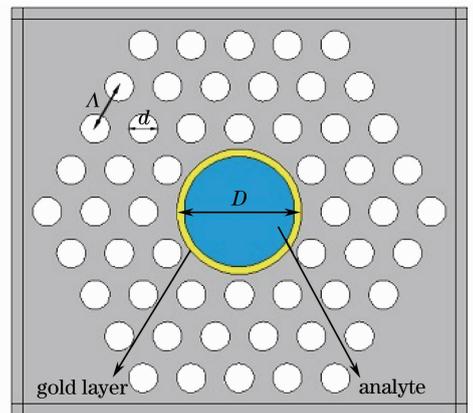


图4 基于液芯MOF-SPR传感器结构示意图
Fig. 4 Schematic design of the MOF-SPR temperature sensor with liquid core

在填充液晶方面,设计了一种反射式掺杂液晶光子晶体光纤电场传感器,传感探头为小于1 cm长

的掺入液晶的实芯 LMA-8 型光子晶体光纤,在光纤掺杂端面镀高反射率银膜以增强反射光强。实验中采用光纤环形器接入射光源和测量用光功率计,平行极板提供电场。实验结果表明,掺杂光纤端面镀膜后反射光强由 21 dB 增大到 9 dB,灵敏度增大到 6 dB/(kV·mm)(其中电压采用均方根值),该系统可有效排除系统噪声及误差带来的干扰,具有较高的测量精度和灵敏度;传感器的全光纤及小尺寸设计使其更容易集成到其他器件中,这为小尺寸电场测量传感器的制造提供了有力的依据^[83]。与此同时,利用有限元方法数值模拟了填充 5CB 液晶(4-氰基-4'-戊基联苯)的 MOF 在太赫兹波段的温度传感特性。比较了不同纤芯半径的情况。用反谐振模型解释了带隙型的光子晶体光纤的温度传感机制。分别讨论了该种 MOF 的基模有效折射率、传输模式、有效模场面积、色散等随温度的变化特性,并且比较了不同纤芯半径下的情况。结果表明,纤芯半径越大,MOF 受温度调制越显著,通过温度调谐可以得到从正到负的色散参数转变。上述研究为太赫兹波段的温度传感器及色散补偿器件的研制奠定了良好的理论基础^[84]。

在基于 SPR 效应的 MOF 传感器方面,设计了一种液芯 MOF-SPR 温度传感器,在中间大空气孔的纤芯中填充甘油,周围镀一层金膜,如图 4 所示^[85]。该种结构使得 MOF 的导光机理由带隙型转变为全内反射型,能够大大拓宽其通光范围。由于甘油在不同温度下的折射率不同,可以通过测量透射光的特征参数得到纤芯中甘油的折射率,从而推断环境温度。通过对液芯直径和金属膜厚度的不同选择可以优化传感灵敏度,计算结果表明,利用幅度探测的方法,系统最大分辨率能够达到 350 RIU^{-1} ,若利用光谱探测法探测,其最大光谱灵敏度为 $2.54 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 。

在典型结构的 MOF-SPR 传感器的基础上,又设计出了大孔径微流体通道的 MOF-SPR 传感器,如图 5 所示^[86]。此种结构的 MOF 减小了包层空气孔的数量,结构相对简单,控制也相对容易,并且扩大了空气孔直径,增加了待测样品与金属层的接触面积,易于实现等离子体模式与芯导模式的能量耦合,能够有效地测量微流体的折射率,提高传感器的灵敏度和分辨率。利用幅度探测的方法,可以得到传感灵敏度为 300 RIU^{-1} 。若利用光谱探测法探测,最大光谱灵敏度为 $2 \mu\text{m}/\text{RIU}$ 。因此,这种设计的 MOF-SPR 传感器更为实际可行,且灵敏度和分

辨率都有所提高。

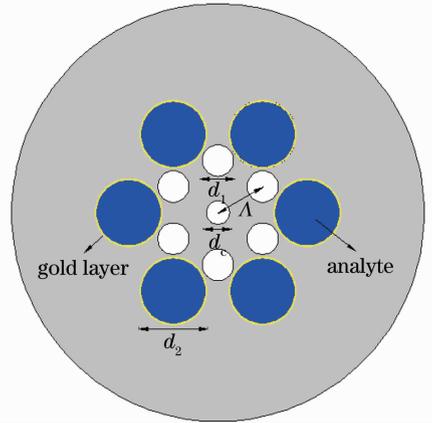


图 5 大孔径微流体通道 MOF-SPR 传感器结构示意图
Fig. 5 Schematic design of the MOF-SPR sensor with large size microfluidic channel

针对在微米量级的气孔内镀膜操作的复杂性和难以重复使用的缺点,本课题组进一步采用向大占空比柚子型 MOF 中填充纳米银线的方法来实现表面等离子共振传感。通过调整柚子型 MOF 空气孔中的纳米银线的个数、银线之间的距离以及填充的纳米银线的个数,来优化 MOF-SPR 的传感特性。数值模拟结果表明,同一空气孔中,银线之间的距离在 $2 \mu\text{m}$ 左右时,可以获得 $2400 \text{ nm}/\text{RIU}$ 的最佳灵敏度;对于孔中银线的个数,三根银线可以获得较高的灵敏度,当银线个数更多时,灵敏度基本达到稳定。为使模拟结果更接近于实验,还进行了纳米银线的不规则性填充的模拟计算。结果显示,其填充的不规则性对于传感器的灵敏度 (183 RIU^{-1}) 基本无影响。这样,在实际的实验操作中,即可以不考虑纳米银线填充不规则性对灵敏度影响的问题^[87]。

在基于表面增强拉曼效应的 MOF 传感器方面,对球状、半球状及柱状型纳米银颗粒的 SERS 效应进行数值仿真,并对相近尺寸、间距的基底进行仿真以便对结果进行比较。数值模拟表明,对于给定结构的基底,增强因子与入射波长具有强烈的依赖关系,这主要是由强烈依赖于纳米结构尺寸和形状的等离子体的分布特性所决定的;对于球形和半球形纳米粒子而言,小的粒子间距对于产生较大的拉曼增强至关重要。以上结论对制备耐用、精确的 SERS 基底模型具有重要的指导意义^[88]。

6 结论与展望

基于微结构光纤横向结构的可集成性,液体材料填充的微结构光纤光子器件以其新颖的理念和灵

活的设计为新型光子器件的开发提供了一个更为广阔的研究平台。从光场、温度、电场、磁场、声场等各种物理场同功能材料的相互作用出发,系统阐述了当前填充 MOF 功能材料的种类、特性和填充的方法,并详细介绍了基于液体填充微结构光纤制作的可调谐光子器件及光纤传感器件。该领域未来的发展趋势在于:

1) 完善液体填充 MOF 中的模场分布和光学传输的数值计算方法,通过深入分析带隙理论和耦合模理论,揭示微结构光纤与功能材料相互作用的物理机制及光子运动机制,为新型光子器件的设计提供指导;

2) 探索新型光纤结构、新型物理机制的功能材料及其在外界各种物理场作用下的响应,实现多物理场多参数的综合调谐与测量;

3) 进一步完善选择性填充等新型填充方法,提高光子器件设计的灵活性;

4) 填充液体的 MOF 功能器件及传感器要与成熟的光纤光路系统(例如 Sagnac 干涉环、马赫-曾德尔干涉仪、法布里-珀罗干涉仪等)相结合,并结合光纤光栅、光纤微纳加工等后处理技术,从而实现新器件的设计与制作;

5) 可以将所研究的 MOF 拓展至其他波段(例如 THz 波段),利用液晶、磁流体、石墨烯等作为填充材料,探索新波段光纤光子器件的研究和开发;

6) 探索成品化的 MOF 拉制、填充和封装工艺,以便实现工业化批量生产,将基于液体填充的新型微结构光纤光子器件真正应用于实际的生产和生活。

参 考 文 献

- 1 R. He, P. Sazio, A. Peacock *et al.*. Integration of gigahertz-bandwidth semiconductor devices inside microstructured optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(3): 174~179
- 2 J. Knight. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 847~851
- 3 P. Russell. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 4 J. Knight, T. Birks, P. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 5 J. Knight, J. Broeng, T. Birks *et al.*. Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, **282** (5393): 1476~1478
- 6 T. Birks, J. Knight, P. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 7 J. Knight, T. Birks, R. Cregan *et al.*. Large mode area photonic crystal fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34** (13): 1347~1348
- 8 A. Ortigosa-Blanch, J. Knight, W. Wadsworth *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1325~1327

- 9 K. Saitoh, M. Koshiba. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10): 2027~2032
- 10 T. Birks, D. Mogilevtsev, J. Knight *et al.*. Dispersion compensation using single-material fibers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 674~676
- 11 R. Tang, J. Lasri, P. Devgan *et al.*. Microstructure-fibre-based optical parametric amplifier with gain slope of ~200 dB/W/km in the telecom range[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(2): 195~196
- 12 Geng Pengcheng, Zhang Weigang, Zhang Shanshan *et al.*. Design of new type single-polarization single-mode photonic crystal fiber with wide bandwidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706001
- 耿鹏程, 张伟刚, 张珊珊等. 新型宽带单偏振单模光子晶体光纤的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706001
- 13 J. Shephard, J. Jones, D. Hand *et al.*. High energy nanosecond laser pulses delivered single-mode through hollow-core PBG fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(4): 717~723
- 14 Xi Xiaoming, Chen Zilun, Sun Guilin *et al.*. Dual-wavelength pumped supercontinuum generation in tapered photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0206001
- 奚小明, 陈子伦, 孙桂林等. 双波长抽运拉锥光子晶体光纤产生超连续谱研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0206001
- 15 A. Agrawal, N. Kejalakshmy, B. Rahman *et al.*. Soft glass equiangular spiral photonic crystal fiber for supercontinuum generation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(22): 1722~1724
- 16 S. Afshar, S. Warren-Smith, T. Monro. Enhancement of fluorescence-based sensing using microstructured optical fibres [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 17891~17901
- 17 T. Monro, W. Belardi, K. Furusawa *et al.*. Sensing with microstructured optical fibres[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2001, **12**(7): 854~858
- 18 W. Macpherson, E. Rigg, J. Jones *et al.*. Finite-element analysis and experimental results for a microstructured fiber with enhanced hydrostatic pressure sensitivity [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1227~1231
- 19 Lu Xin, Bi Weihong, Ma Shuo *et al.*. Optical voltage transducer based on two-hole photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105003
- 芦鑫, 毕卫红, 麻硕等. 双孔光子晶体光纤光学电压传感方案研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105003
- 20 B. Eggleton, C. Kerbage, P. Westbrook *et al.*. Microstructured optical fiber devices[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~713
- 21 A. Samoc. Dispersion of refractive properties of solvents: chloroform, toluene, benzene, and carbon disulfide in ultraviolet, visible, and near-infrared[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **94**(9): 6167~6174
- 22 C. Kerbage, P. Steinvurzel, P. Reyes *et al.*. Highly tunable birefringent microstructured optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(10): 842~844
- 23 B. Kuhlmeier, B. Eggleton, D. Wu. Fluid-filled solid-core photonic bandgap fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(11): 1617~1630
- 24 A. Lorenz, R. Schuhmann, H. Kitzrow. Infiltrated photonic crystal fiber: experiments and liquid crystal scattering model[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3519~3530
- 25 M. Haakestad, T. Alkeskjold, M. Nielsen *et al.*. Electrically tunable photonic bandgap guidance in a liquid-crystal-filled photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 819~821
- 26 A. Candiani, M. Konstantaki, W. Margulis *et al.*. A spectrally tunable microstructured optical fibre Bragg grating utilizing an infiltrated ferrofluid [J]. *Opt. Express*, 2010, **18** (24):

24654~24660

- 27 Y. P. Miao, B. Liu, K. L. Zhang *et al.*. Temperature tunability of photonic crystal fiber filled with Fe₃O₄ nanoparticle fluid[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(2): 021103
- 28 A. Sharma, R. Jha, B. Gupta. Fiber-optic sensors based on surface plasmon resonance: a comprehensive review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, **7**(8): 1118~1129
- 29 Y. Zhang, C. Gu, A. Schwartzberg *et al.*. Surface-enhanced Raman scattering sensor based on D-shaped fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(12): 123105
- 30 A. Sutherland. Quantum dots as luminescent probes in biological systems [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2002, **6**(4): 365~370
- 31 M. Kazes, D. Lewis, Y. Ebenstein *et al.*. Lasing from semiconductor quantum rods in a cylindrical microcavity [J]. *Advanced Materials*, 2002, **14**(4): 317~321
- 32 S. Kawanishi, T. Komukai, M. Ohmori *et al.*. Photoluminescence of semiconductor nanocrystal quantum dots at 1550 nm wavelength in the core of photonic bandgap fiber[C]. Baltimore: Lasers and Electro-Optics Conference, 2007, 1~2
- 33 K. Nielsen, D. Noordegraaf, T. Sørensen *et al.*. Selective filling of photonic crystal fibres[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, **7**(8): 13~20
- 34 X. Zhang, R. Wang, F. Cox *et al.*. Selective coating of holes in microstructured optical fiber and its application to in-fiber absorptive polarizers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15** (24): 16270~16278
- 35 Y. Huang, Y. Xu, A. Yariv. Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(22): 5182~5184
- 36 L. Xiao, W. Jin, M. Demokan *et al.*. Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 9014~9022
- 37 Y. Wang, X. Tan, W. Jin *et al.*. Improved bending property of half-filled photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12197~12202
- 38 W. Qian, C. Zhao, Y. Wang *et al.*. Partially liquid-filled hollow-core photonic crystal fiber polarizer[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3296~3298
- 39 B. Cumpston, S. Ananthavel, S. Barlow *et al.*. Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication[J]. *Nature*, 1999, **398**(6722): 51~54
- 40 M. Deubel, G. Freymann, M. Wegener *et al.*. Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications [J]. *Nature Materials*, 2004, **3** (7): 444~447
- 41 T. Gissibl, M. Vieweg, M. Vogel *et al.*. Preparation and characterization of a large mode area liquid-filled photonic crystal fiber; transition from isolated to coupled spatial modes[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2012, **106**(3): 1~7
- 42 F. Wang, W. Yuan, O. Hansen *et al.*. Selective filling of photonic crystal fibers using focused ion beam milled microchannels[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(18): 17585~17590
- 43 C. Kerbage, A. Hale, A. Yablon *et al.*. Integrated all-fiber variable attenuator based on hybrid microstructure fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(19): 3191~3193
- 44 T. Larsen, A. Bjarklev, D. Hermann *et al.*. Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2589~2596
- 45 F. Du, Y. Lu, S. Wu. Electrically tunable liquid-crystal photonic crystal fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2181~2183
- 46 J. Lægsgaard, T. Alkeskjold. Designing a photonic bandgap fiber for thermo-optic switching[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(5): 951~957
- 47 Y. Wang, W. Jin, L. Jin *et al.*. Optical switch based on a fluid-filled photonic crystal fiber Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(23): 3683~3685
- 48 Y. Wang, H. Bartelt, W. Ecke *et al.*. Thermo-optic switching effect based on liquid-filled photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(3): 164~166
- 49 Y. Wang, X. Tan, W. Jin *et al.*. Temperature-controlled transformation in fiber types of fluid-filled photonic crystal fibers and applications[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(1): 88~90
- 50 M. Vieweg, S. Pricking, T. Gissibl *et al.*. Tunable ultrafast nonlinear optofluidic coupler [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37** (6): 1058~1060
- 51 A. Abramov, B. Eggleton, J. Rogers *et al.*. Electrically tunable efficient broad-band fiber filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(4): 445~447
- 52 P. Steinvurzel, B. Eggleton, C. Sterke *et al.*. Continuously tunable bandpass filtering using high-index inclusion microstructured optical fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(8): 463~464
- 53 L. Scolari, T. Alkeskjold, A. Bjarklev. Tunable Gaussian filter based on tapered liquid crystal photonic bandgap fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(22): 1270~1271
- 54 J. Du, Y. Liu, Z. Wang *et al.*. Liquid crystal photonic bandgap fiber; different bandgap transmissions at different temperature ranges[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(29): 5321~5324
- 55 T. Alkeskjold, J. Lægsgaard, A. Bjarklev *et al.*. All-optical modulation in dye-doped nematic liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24): 5857~5871
- 56 V. Hsiao, C. Ko. Light-controllable photoresponsive liquid-crystal photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12670~12676
- 57 P. Zu, C. Chan, L. Siang *et al.*. Magneto-optic fiber Sagnac modulator based on magnetic fluids [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(8): 1425~1427
- 58 X. Yang, Y. Liu, F. Tian *et al.*. Optical fiber modulator derivatives from hollow optical fiber with suspended core[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(11): 2115~2117
- 59 A. Sharkawy, D. Pustai, S. Shi *et al.*. Modulating dispersion properties of low index photonic crystal structures using microfluidics[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 2814~2827
- 60 C. Yu, J. Liou, S. Huang *et al.*. Tunable dual-core liquid-filled photonic crystal fibers for dispersion compensation [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4443~4451
- 61 J. Hsu, G. Ye. Dispersion ultra-strong compensating fiber based on a liquid-filled hybrid structure of dual-concentric core and depressed-clad photonic crystal fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2012, **29**(8): 2021~2028
- 62 A. Czaplá, T. Wolinski, S. Ertman *et al.*. Sensing applications of photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystals [C]. Poland: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2007, 1~5
- 63 D. Wu, B. Kuhlmeý, B. Eggleton. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 322~324
- 64 T. Han, Y. Liu, Z. Wang *et al.*. Avoided-crossing-based ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(12): 2061~2063
- 65 H. Lee, M. Schmidt, P. Uebel *et al.*. Optofluidic refractive-index sensor in step-index fiber with parallel hollow micro-channel [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(9): 8200~8207
- 66 Li Xuejin, Yu Yongqin, Hong Xueming *et al.*. Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1140~1144
李学金, 于永芹, 洪学明等. 基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1140~1144

- 67 Y. Yu, X. Li, X. Hong *et al.*. Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15383~15388
- 68 Y. Xu, X. Chen, Y. Zhu. High sensitive temperature sensor using a liquid-core optical fiber with small refractive index difference between core and cladding materials[J]. *Sensors*, 2008, **8**(3): 1872~1878
- 69 Wang Ruoqi, Yao Jianquan, Zhou Rui *et al.*. Research of photonic crystal fiber temperature sensor with mixture liquid filling[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(11): 1609~1612
王若琪, 姚建铨, 周睿等. 填充混合液体的光子晶体光纤温度传感研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(11): 1609~1612
- 70 A. Hassani, M. Skorobogatiy. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24): 11616~11621
- 71 B. Gauvreau, A. Hassani, M. Fehri *et al.*. Photonic bandgap fiber-based surface plasmon resonance sensors[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11413~11426
- 72 X. Yu, Y. Zhang, S. Pan *et al.*. A selectively coated photonic crystal fiber based surface plasmon resonance sensor [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(1): 015005
- 73 H. Yan, C. Gu, C. Yang *et al.*. Hollow core photonic crystal fiber surface-enhanced Raman probe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(20): 204101
- 74 Y. Zhang, C. Shi, C. Gu *et al.*. Liquid core photonic crystal fiber sensor based on surface enhanced Raman scattering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(19): 193504
- 75 A. Peacock, A. Amezcua-Correa, J. Yang *et al.*. Highly efficient surface enhanced Raman scattering using microstructured optical fibers with enhanced plasmonic interactions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(14): 141113
- 76 X. Yang, C. Shi, D. Wheeler *et al.*. High-sensitivity molecular sensing using hollow-core photonic crystal fiber and surface-enhanced Raman scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(5): 977~984
- 77 D. Noordegraaf, L. Scolari, J. Lægsgaard *et al.*. Electrically and mechanically induced long period gratings in liquid crystal photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 7901~7912
- 78 Song Xiaoli, Bai Yukun, Ren Guangjun *et al.*. Analysis of temperature sensing characteristics of a long-period grating formed in a liquid-filled photonic crystal fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205007
宋晓利, 白育堃, 任广军等. 液体填充光子晶体光纤中长周期光栅的温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1205007
- 79 L. Rindorf, O. Bang. Highly sensitive refractometer with a photonic-crystal-fiber long-period grating [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6): 563~565
- 80 J. Du, Y. Liu, Z. Wang *et al.*. Electrically tunable Sagnac filter based on a photonic bandgap fiber with liquid crystal infused [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 2215~2217
- 81 W. Qian, C. Zhao, S. He *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(9): 1548~1550
- 82 R. Wang, J. Yao, Y. Miao *et al.*. Thermo-optic switch based on fluid-filled photonic crystal fiber [J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8**(6): 430~432
- 83 Meng Qingying, Ren Guangjun, Li Jinghui *et al.*. Experimental study of reflection-type liquid crystal infiltrated photonic crystal fibers for electric field intensity measurements [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(9): 1713~1716
孟庆莹, 任广军, 李敬辉等. 反射式掺杂液晶光子晶体光纤电场传感实验研究[J]. *光电子·激光*, 2012, **23**(9): 1713~1716
- 84 L. Lü, G. Ren, B. Liu *et al.*. Temperature influence on propagation characteristics of liquid crystal photonic crystal fiber of terahertz wave [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2011, **13**(7): 755~759
- 85 P. Bing, Z. Li, J. Yao *et al.*. A photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance temperature sensor with liquid core [J]. *Mod. Phys. Lett. B*, 2012, **26**(13): 1250082
- 86 P. Bing, J. Yao, Y. Lu *et al.*. A surface-plasmon-resonance sensor based on photonic-crystal-fiber with large size microfluidic channels [J]. *Opt. Appl.*, 2012, **42**(3): 1~9
- 87 Y. Lu, C. Hao, B. Wu *et al.*. Grapefruit fiber filled with silver nanowires surface plasmon resonance sensor in aqueous environments [J]. *Sensors*, 2012, **12**(9): 12016~12025
- 88 Di Zhigang, Yao Jianquan, Zhang Peipei *et al.*. Simulation and optimization of SERS effect in nano Ag substrates [J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(8): 850~855
邸志刚, 姚建铨, 张培培等. 纳米银基底表面增强拉曼散射效应仿真及优化[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(8): 850~855