

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究

王家璐 杜木清 张伶俐 刘永军 孙伟民

Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals

Wang Jia-Lu Du Mu-Qing Zhang Ling-Li Liu Yong-Jun Sun Wei-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 120702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.120702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究

Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors

物理学报.2015, 64(5): 050704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050704>

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706> 基于液晶和DSP的强光局部

选通智能网络摄像系统研究

Study on the partial gating smart network camera for controlling strong light intensity based on DSP and liquid crystal

物理学报.2013, 62(21): 214210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214210> 镀膜长周期光纤光栅的单峰

宽带滤波特性

Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings

物理学报.2012, 61(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200702> 飞秒激光刻蚀非平行壁光纤

微腔 Mach-Zehnder 干涉仪特性及其流体传感研究

Study on characteristics and fluid sensing of unparallel wall fiber micro-cavity Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining

物理学报.2012, 61(17): 170701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.170701>

专题: 液晶光学及应用

编者按 液晶是介于液态与固体结晶态之间的一种物质状态, 因此具备了很多独特的性质, 包括大的光折变特性、电光特性等. 自发现液晶以来, 其研究已发展成为一个引人注目的学科, 同时在科学和工程应用方面也得到了发展. 液晶在材料、物理、化学科学中扮演着重要的角色, 是科学家研究化学结构与物理性质关系的基础材料. 在应用方面, 液晶显示已经成长为超过100亿美元的全球巨大产业, 入选国家战略新兴产业. 本刊特组织“液晶光学及应用”专题, 从材料、光学特性、器件、应用等方面介绍该领域的发展现状和最新的研究成果. 在材料和光学特性方面, 包括混合液晶分子动力学、胆甾相和蓝相液晶、新型液晶的表面等离子体效应等; 在器件和应用方面, 包括电光调制及光光调制的全息显示技术及薄膜晶体管驱动的研究; 在非显示应用方面, 则有液晶填充光子晶体光纤的报道. 通过对液晶光学的深入研究, 有望在基础新材料和核心器件方面得到突破, 推动物理、化学、材料基础学科的前沿发展, 并在电子信息产业领域得到重要应用.

(客座编辑: 中国物理学会液晶分会 李树军 苏翼凯 宣丽)

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究*

王家璐¹⁾²⁾ 杜木清²⁾ 张伶俐³⁾ 刘永军^{1)2)†} 孙伟民²⁾

1)(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

2)(哈尔滨工程大学, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

3)(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150001)

(2014年12月24日收到; 2015年4月15日收到修改稿)

将5种不同折射率的液晶分别填入实芯光子晶体光纤的空气孔中, 通过改变外场条件, 研究其输出光谱的变化规律, 并进行了理论模拟分析. 结果表明: 填充液晶后, 输出光谱由全通变为多个波峰的带隙式; 同时, 液晶的折射率差值越大, 其波峰位置越向长波长方向移动, 且相对光强的对比度可以达到16 dB; 温度由20 °C上升到85 °C时, 波峰向短波长方向移动, 最大调控范围可达41 nm; 调节电压从0—250 V, 输出光谱的相对光强变小, 但波峰具有较好的稳定性; 在室温下, 波峰不随入射光偏振态的变化而变化. 该液晶光子晶体光纤可应用于温控可调谐滤波器或电控衰减器.

关键词: 光子晶体光纤, 液晶, 光子带隙, 传感器

PACS: 07.60.Vg, 42.70.Df, 42.81.Wg

DOI: 10.7498/aps.64.120702

1 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fibers, PCFs) 是一种纤芯周围周期性排布着空气孔的微结构光

纤, 具有无截止单模、低损耗以及可进行微结构设计改造等特性^[1], 近年来备受关注^[2,3]. 根据不同的传导机理可将PCF分为两类: 一类是折射率传导型, 即纤芯的折射率大于包层的有效折射率, 与传统光纤的全内反射导光机理相似; 另一类是光子

* 国家自然科学基金 (批准号: 61107059, 61308052, 61077047) 和教育部111引智基地项目 (批准号: B13015) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

带隙型, 即纤芯的折射率小于包层的有效折射率, 但由于包层的折射率具有规则的周期排布, 使得出现的光子带隙效应 (photonic bandgap) 将频率处于带隙内的光束束缚在纤芯中, 进而达到光传导的目的 [4]. 但是, PCF 一旦被拉制完成, 传输特性就不再变化, 这在很大程度上限制了其在传感器领域的应用. 如果将液体材料 (如液晶 (liquid crystals, LCs)、折射率匹配液等) 填入 PCF 包层的空气孔中, 通过外部环境变化 (如温度、压力等) 就可能实现 PCF 对传输光谱的灵活控制 [5-7].

LCs 具有折射率随外场变化的特性, 是很好的填充材料 [8]. 2010 年, Mathews 等 [9] 制作出了基于全部填充结构的实芯液晶光子晶体光纤 (photonic liquid crystal fibers, PLCFs) 的电控衰减器, 并实验测得其截止率可达到 40 dB. 2012 年, Tefelska 等 [10] 制造了一种基于光子带隙型大模场面积的多模 PLCF, 该 PLCF 对温度的变化具有较高的灵敏度. 同年, 他们又在 PCF 空气孔中填入了折射率低于纤芯折射率的 LC, 测量了该 PLCF 的相关参数, 并提出了其未来发展的可行性 [11]. 2013 年, Peng 等 [12] 选择性地将 LC 填入 PCF 最内层空气孔中, 并测量了其对温度变化的灵敏度. 在这些研究工作中, 多数侧重于 PLCF 输出光强度的变化关系, 尚未见关于其输出光谱传输特性的研究; 且上述研究大多是针对填充某一种 LC 的 PLCF, 鲜见关于填充多种 LC 的 PLCF 传输特性的实验研究. 本文分别将 5 种不同折射率的 LC 填入实芯 PCF 中, 并对其输出特性进行了实验研究和理论模拟分析; 同时, 研究了 PLCF 的温度调谐、电调谐特性和偏振敏感特性.

2 LC 填充及实验系统

2.1 LC 填充

实验所使用 PCF 的横截面如图 1 (a) 所示, 为单模无截止的实芯 PCF, 材质为纯石英, 其纤芯直径为 $7.0 \mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \mu\text{m}$, 空气孔直径为 $2 \mu\text{m}$ 且呈六边形周期性排布, 空气孔间距为 $5.0 \mu\text{m}$. 实验中所研究的 PLCF 为全填式, 即 PCF 的所有空气孔中全部填入 LC. 将待测 PCF 的一端剥去涂覆层, 用光纤切割刀将端面切平, 随后将处理后的 PCF 插入 LC 中, 利用毛细现象将 LC 吸入 PCF 中. 通过改变填充温度和填充时间, 可以精确地控制填入 PCF 中 LC 的长度. 如图 1 (b) 所示,

在偏光显微镜下可以测量出填充的 LC 的长度. 从图 1 (b) 可以观察到, 没有填充 LC 的空 PCF 包层显得暗淡, 填充了 LC 的 PCF 由于 LC 的双折射特性, 包层较亮. 实验中所使用的待测 PLCF 全长皆为 20 cm, 填充的 LC 长度约为 10 cm.

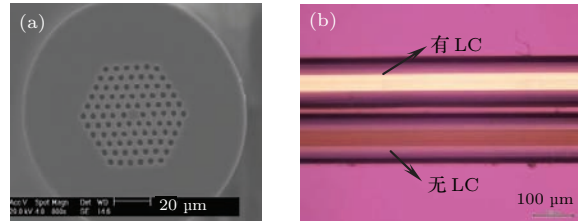


图 1 PCF 实物图 (a) 电子显微镜下的 PCF 横截面图; (b) 偏光显微镜下的 PLCF 对比图

Fig. 1. The picture of the actual object of PCF: (a) cross section of the PCF under the electron microscope; (b) the image of the full-filled PLCF under a polarizing microscope.

2.2 实验系统

我们采用如图 2 所示的实验系统研究填充不同 LC 的 PLCF 的传输光谱. 实验中所使用的光源为宽带光源, 其输出端为全内反射式 PCF, 实验研究工作波长为 400—1000 nm, 且输出光具有良好的稳定性. 光源所发出的光经光纤耦合器被耦合进待测 PLCF 中, 最后经待测 PLCF 输出端进入光谱仪进行分析. 此外, 在实验中将 PLCF 有 LC 的一端置于温控系统或电场中, 进行温度和电场的调谐特性研究.

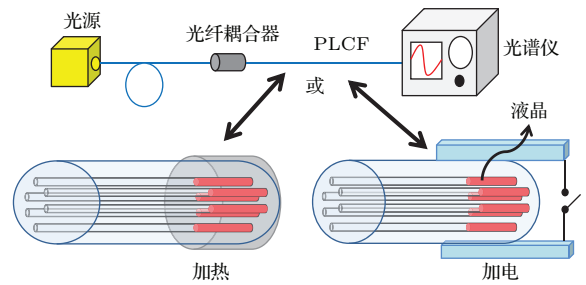


图 2 实验装置示意图

Fig. 2. Schematic geometry of the full-filled PLCFs.

3 实验结果与讨论

3.1 填充不同的 LC

图 3 为光源的输出光通过未填充 LC 的 PCF 所测得的光谱图. 在室温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 下, 分别测量了 5 种填充了不同参数 LC 的 PLCF 的输出光谱, 如

图4所示. 表1列出了与图4对应的最大透射波峰λ的位置及与之相应的研究参数.

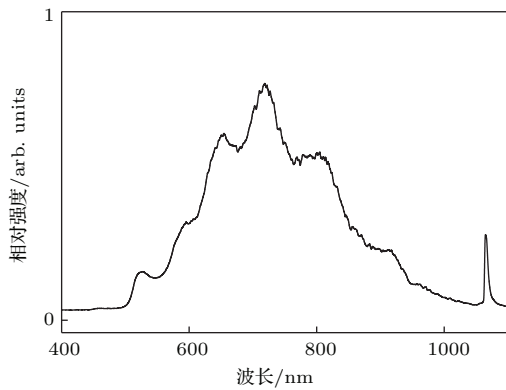


图3 空PCF输出光谱图

Fig. 3. The transmission spectrum of unprocessed PCF.

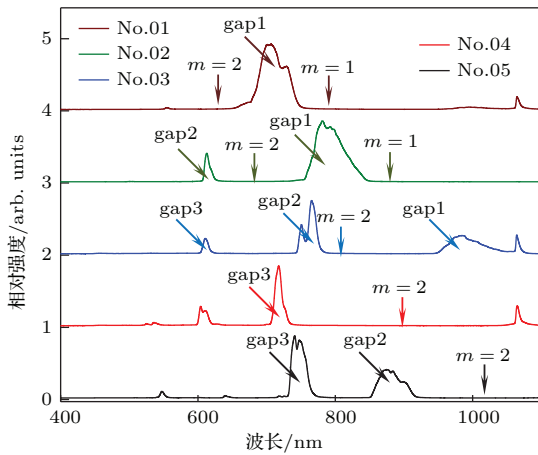


图4 5种全填充PLCF输出光谱图

Fig. 4. The transmission spectra of PLCFs filled with different kinds of LCs.

表1 不同LC对应的输出光谱参数

Table 1. The transmission parameters of PLCFs filled with different kinds of LC.

LC 编号	$\Delta n(n_e - n_o)$	波长 λ/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$ (温调)	对比 度/dB
01	0.083($n_o = 1.483$)	706	41	16.794
02	0.111($n_o = 1.489$)	792	24	16.425
03	0.149($n_o = 1.508$)	765	5	15.542
04	0.249($n_o = 1.514$)	717	40	15.495
05	0.375($n_o = 1.501$)	741	13	16.206

对比图3和图4可以观察到, 经LC填充后的PCF输出光谱图由无截止全通转变为只有几个波峰的带隙式. 这是由于空气孔中填充的LC折射率

大于PCF的折射率, 使得包层的有效折射率大于纤芯的折射率, 其传导机理由全内反射式变为光子带隙式. 因此, 一些特定频率(或波长)的传输光被PCF包层中周期性排布的填充孔限制在折射率较低的纤芯中, 能量只能沿着PCF的轴向进行传输, 即表现为出射光谱中的波峰(即带隙). 从图4可以看出, 填充的LC参数不同, 其输出光谱中带隙(gap)的数量和位置也有所不同. 带隙的数量与位置可由Sun等[13]提出的关于PLCF分析公式决定:

$$\lambda_m = \left(1 + \frac{\Delta n}{n_o}\right) \frac{2d\sqrt{n_o^2 - n_s^2}}{m + 1/2} \quad (m = 1, 2, \dots), \quad (1)$$

其中, λ_m 为透射率最小值位置对应的波长, 其与图4中的带隙位置相间隔; Δn 为LC非寻常光折射率 n_e 与寻常光折射率 n_o 的差值(表1); n_s 为PCF材料的折射率.

根据(1)式, 若 m 最小值取1, 当 Δn 增加时, 其透射率最小值波长 λ_m 向长波方向移动. 实验中可以观察到, 随着LC的 Δn 增大, 其透射率最高的波峰gap1的中心波长也向长波长方向移动. 但是对于04和05号PLCF, 其gap1已经超出实验测量范围, 所以图4中所示为gap2, 即 m 取值为1和2之间透射率最高的波峰.

为了更直接地体现出填充LC的有效折射率与带隙之间的关系, 我们利用平面波展开法, 对填充了不同有效折射率LC的PLCF进行模拟, 结果如图5所示. 图5(a)–(c)中填充LC的有效折射率分别为1.533, 1.625和1.705(LC的折射率通常在1.5–1.7之间变化). 随着有效折射率 n 的增加, 第一带隙对应的频率逐渐减小, 即输出光谱中表现为波峰向长波长方向移动; 而且, 第一带隙的带隙宽度也随着 n 的增加而变宽, 即输出光谱中表现为波峰的半峰宽度变大; 此外, 带隙的数量也随着 n 的增加而增加, 即输出光谱中表现为波峰数量的增加.

该结构PLCF的波峰相对光强具有较高的对比度, 对比度(dB)定义为在波峰位置±50 nm范围内波峰最高值与波峰外光强最高值的比值, 可达到16 dB, 如表1所列. 并且, 通过填充不同参数的LC, 可以控制其输出波峰的位置, 控制波长可从500–1000 nm之间, 具有较高的可控性, 因此在滤波器领域有潜在的应用.

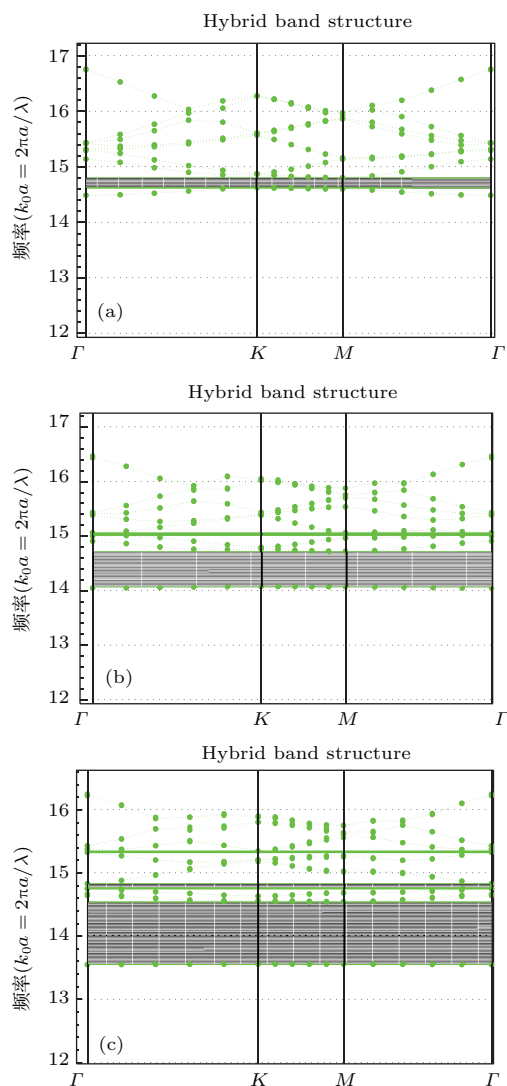


图5 填充不同LC的PLCF的带隙分布 (a) $n = 1.533$; (b) $n = 1.625$; (c) $n = 1.705$

Fig. 5. The bandgaps structure of PLCFs filled with LC of different effective refractive index: (a) $n = 1.533$; (b) $n = 1.625$; (c) $n = 1.705$.

3.2 温度调谐研究

为了进一步研究PLCF的温度调谐特性, 我们分别将5个PLCF有LC的部分放置在加热台上, 从室温 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 逐步加热到 $85\text{ }^\circ\text{C}$, 并实时采集其输出光谱. 表1列出5种LCs填充透射谱中最高波峰所对应的波长调谐范围 $\Delta\lambda$, 图6为填充01号LC的PLCF的温度调谐光谱. 观察图6可知, 当温度升高时输出光强度有减弱的现象. 这是由于LC的折射率大于纤芯的折射率, 导致部分光由纤芯中耦合到LC中, 光纤由单模传输变为多模传输, 在温度升高的过程中, 导致部分高阶模式泄漏, 因而光强有所变化.

由图6和表1可知, 随着温度的升高, 波峰向

短波长方向移动, 但是其对应的波长调谐范围 $\Delta\lambda$ 却不相同, 最大调谐量为 41 nm , 最小为 5 nm , 且没有严格的规律. 根据LC的折射率随波长和温度变化函数^[14]:

$$\Delta n(\lambda, T) \approx \frac{3GS}{2} \frac{\lambda^2 \lambda'^2}{\lambda^2 - \lambda'^2}, \quad (2)$$

其中, λ 为入射光波长; λ' 为共振波长; G 为常数系数; S 为LC分子排布的有序度, 其与温度有关, 温度升高 S 减小, 数值在 $0-1$ 之间.

在波长 λ 和 λ' 一定的情况下, Δn 是有序度 S 的函数, 因此, 随着温度的升高, 有序度 S 减小, Δn 也将减小. 结合(1)式可知, 透射率极小值波长 λ_m 向短波方向移动, 当 Δn 减小为后, λ_m 基本保持不变. 所以在实验中观察到波峰向短波移动. 但是, 同样可以知道 Δn 随温度变化量越大, 波峰移动量也应该越大, 但实验结果并非如此. 这是由于表1中列出的LC折射率为有序度 S 接近1时的测量值, 在测量LC折射率时已经给LC做了取向处理. 但是, 在本实验过程中, PCF的空气孔内壁是不能做取向处理的, 所以LC分子排布的有序度小于1, 因此, 导致 Δn 的实际利用值小于表1中的理想值, 进而影响了 $\Delta\lambda$ 的大小. 同时, 由于不同LC材料的分子大小及黏度系数均不同, 导致其与PCF的空气孔内壁表面的锚定作用不同, 进而LC在PCF的空气孔中的有序度 S 均不相同, 因此导致其传输光谱图随温度变化没有固定规律.

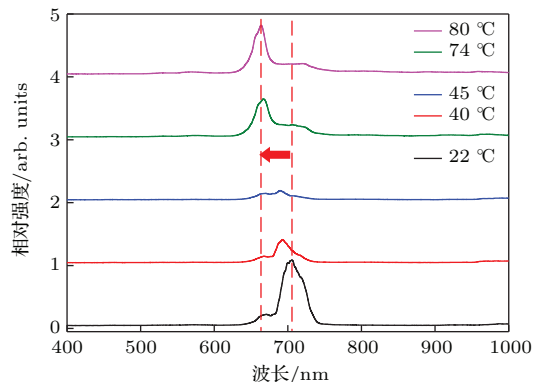


图6 编号01的PLCF在不同温度下的输出光谱图

Fig. 6. The transmission spectra of No. 01 PLCF with different temperature.

3.3 电压调谐研究

为了研究电场对PLCF输出光谱的影响, 将02号PLCF有LC端放置在如图2所示的镀有TiO₂电极的基板中, 通过改变基板之间的电压, 进行电场控制, 实验结果如图7所示.

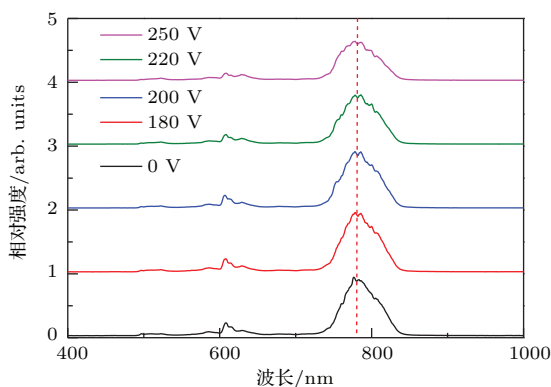


图7 编号02的PLCF在不同电压下的输出光谱图
Fig. 7. The transmission spectra of No. 02 PLCF with different voltage.

图7中电压变化范围为0—250 V. 由图7可知, 随着外加电压的增大, 02号PLCF输出光谱的波形和波峰位置基本保持不变, 但是其光强相对减弱. 由于包层中二氧化硅材质孔间隔的存在, 导致驱动电压较高, 需要进一步改进电极结构以降低驱动电压. 当驱动电压增加时, LC分子会逐渐顺着电场方向排列, 在250 V内LC分子的转动并没有带来PCF包层有效折射率的变化, 因此光谱中的波峰没有明显的移动. 施加电压的过程中光强逐渐变弱, 这也是由高阶模式泄漏造成的. 据此, 其在电控窄带衰减器中可得到应用.

3.4 偏振特性研究

最后, 为了研究入射光的偏振态对PLCF输出光谱的影响, 室温下对05号PLCF进行了实验研究, 实验结果如图8所示.

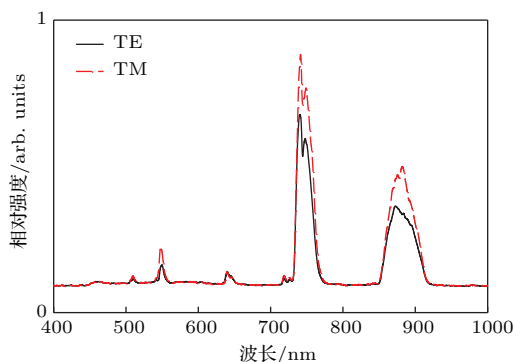


图8 不同偏振态下编号05 PLCF的输出光谱图
Fig. 8. The transmission spectra for two orthogonal polarizations of No. 05 PLCF.

从图8可以看出, 无论入射光的偏振态为横电 (TE) 模或横磁 (TM) 模, 与无偏振片的输出光谱图相比, 05号PLCF的输出峰值位置几乎不变, 其输

出光强只有原来光强的1/2. 由于包层中填充的LC分子未经取向处理, LC分子不会整体偏向于径向的某个方向, 所以双折射现象不明显, 因此对在PLCF中传输光的偏振态是不敏感的.

4 结 论

实验研究了5种LC填充的PCF的传输特性, 并对结果进行了理论分析. 结果表明, LC的折射率差值越大, 其光谱的波峰越向长波方向移动. 对于填充同一种LC的PLCF, 当温度升高时, 波峰向短波长方向移动, 最大可达到41 nm的调谐范围. 随着外加电场的增加, 其输出光谱的相对光强逐渐减小, 但是其波峰对应的中心波长却具有良好的稳定性. 改变入射光偏振态, 其输出光谱不随偏振态的变化而变化. 该结构的PLCF在温控可调谐滤波器及电控衰减器中有潜在的应用.

参考文献

- [1] Pang M, Xiao L M, Jin W, Arismar Cerqueira S Jr 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1422
- [2] Hou J P, Ning T, Gai S L, Li P, Hao J P, Zhao J L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4732 (in Chinese) [侯建平, 宁韬, 盖双龙, 李鹏, 皓建苹, 赵建林 2010 物理学报 **59** 4732]
- [3] Zhang M Y, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Fu B, Yin G B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3278 (in Chinese) [张美艳, 李曙光, 姚艳艳, 张磊, 付博, 尹国冰 2010 物理学报 **59** 3278]
- [4] Cubillas A M, Unterkofler S, Euser T G, Etzold B J M, Jones A C, Sadler P J, Wasserscheid P, Russell P St J 2013 *Chem. Soc. Rev.* **42** 8629
- [5] Qian W W, Zhao C L, He S L, Dong X Y, Zhang S Q, Zhang Z X, Jin S Z, Gou J T, Wei H F 2011 *Opt. Lett.* **36** 1548
- [6] Yu C P, Liou J H 2009 *Opt. Express* **17** 8729
- [7] Kuhlmeier B T, Eggleton B J, Wu D K C 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 1617
- [8] Larsen T T, Bjarklev A 2003 *Opt. Express* **11** 2589
- [9] Mathews S, Farrell G, Semenova Y 2011 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **53** 539
- [10] Tefelska M M, Ertman S, Wolinski T R, Mergo P, Dabrowski R 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 631
- [11] Ertman S, Rodríguez A H, Tefelska M M, Chychłowski M S, Pysz D, Buczyński R, Nowinowski-Kruszelnicki E, Dąbrowski R, Woliński T R 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1208
- [12] Peng Y, Hou J, Zhang Y, Huang Z H, Xiao R, Lu Q S 2013 *Opt. Lett.* **38** 263
- [13] Sun J, Chan C C, Ni N 2007 *Opt. Commun.* **278** 66
- [14] Li J, Wu S T 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 896

SPECIAL ISSUE — Liquid crystal photonics and applications

Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals*

Wang Jia-Lu¹⁾²⁾ Du Mu-Qing²⁾ Zhang Ling-Li³⁾ Liu Yong-Jun^{1)2)†} Sun Wei-Min²⁾

1) (College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

2) (Key Lab of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

3) (Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 24 December 2014; revised manuscript received 15 April 2015)

Abstract

The transmission characteristics of full-filled photonic liquid crystal fibers (PLCFs) which are filled with five kinds of liquid crystals (LCs) are experimentally studied and theoretically analyzed. The influences of temperature and external electric field on the transmission characteristics of PLCFs are also discussed in this paper. The transmission spectra of PLCFs show obvious bandgaps, and the number and the central wavelengths of the bandgaps depend on the average value of the refractive indices of LCs. By changing the temperature from 20 °C to 80 °C, a blue shift in the bandgap is observed, and the maximum tuning range of the bandgap is 41 nm. Then, with the voltage turning from 0 V to 250 V, the output power of the transmission spectrum decreases, while the central wavelength of the bandgap is almost unchanged. Finally, the transmission spectrum keeps a good stability, even if the polarization state of the input light changes.

Keywords: photonic crystal fiber, liquid crystal, photonic bandgap, sensor

PACS: 07.60.Vg, 42.70.Df, 42.81.Wg

DOI: [10.7498/aps.64.120702](https://doi.org/10.7498/aps.64.120702)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61107059, 61308052, 61077047) and the 111 Project (B13015) to the Harbin Engineering University, China.

† Corresponding author. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn