

## 热可调液晶填充微结构聚合物光纤设计及特性分析\*

王豆豆 王丽莉<sup>†</sup> 李冬冬

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2011年8月29日收到; 2011年9月22日收到修改稿)

通过在微结构聚合物光纤 (mPOF) 的包层空气孔中填充液晶材料获得了高度热可调的带隙型 mPOF. 带隙随温度的增加发生显著的蓝移, 带隙上边界的温度灵敏度可达  $-5.5 \text{ nm}^\circ\text{C}$ . 采用全矢量有限元方法对模场特性以及基模有效模场面积的分析结果表明, 该填充液晶的 mPOF 在带隙的中心波长附近具有大的有效模场面积, 和相同结构未填充液晶的 mPOF 连接时具有较高的功率耦合效率. 研究结论为 mPOF 在温度传感领域的应用及各种可调光纤器件的制备提供了理论参考.

**关键词:** 微结构聚合物光纤, 液晶, 光子带隙, 有限元方法

**PACS:** 81.05.Lg, 42.70.Qs, 42.79.Kr

## 1 引言

光子晶体光纤 (PCF) 也称作微结构光纤 (MOF), 包层中具有轴向排列的周期性微结构空气孔, 自问世以来一直备受人们关注<sup>[1]</sup>. 与传统光纤相比, MOF 的结构设计更加灵活. 通过改变包层空气孔的形状、尺寸、排列方式及数目, 可以获得各种新奇的特性, 比如无限单模传输, 极大或极小的模场面积, 高模式双折射以及良好的色散特性<sup>[2-5]</sup>. 根据导光机理的不同可将 MOF 分为全内反射 (TIR) 型和光子带隙 (PBG) 型两大类. 然而, 已经有研究表明通过在 MOF 的包层空气孔中填充合适的高折射率材料, 如高折射率的液体或者液晶 (LC), 可以将全内反射型 MOF 转变为光子带隙型 MOF<sup>[6,7]</sup>. 其中向列相液晶由于具有高双折射、灵敏的热调谐和电调谐等优良特性, 被广泛用于设计基于光子带隙效应的可调光纤器件, 如阈值开关、可调双折射控制器和可调滤波器等<sup>[8]</sup>. 这类器件具有极小的插入损耗, 并且可以在最小的外部影响下获得调谐性. 可以说, 液晶与光子晶体光纤的带隙效应相结合, 为小体积、高性能光学器件的研

制提供了契机.

近年来, 微结构聚合物光纤 (mPOF) 因比传统的石英基质 MOF 具有加工温度低、预制棒的制备方法灵活多样、成本低和基质材料种类多等优点<sup>[9]</sup> 而激起了人们广泛的研究兴趣. 除了具有微结构光纤的各种新奇特性外, 特有的材料优势为 mPOF 器件的性能设计提供了更多的便利. 在我们以前的文章中, 对聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 基质 mPOF 的制备以及在光纤传像、光纤传感等方面的应用进行了大量理论和实验研究<sup>[10-12]</sup>. 与制备 MOF 常用的基质材料——熔石英相比, PMMA 具有更高的折射率 ( $n = 1.49$ ) 和热光系数. Yuan 等人通过在 PMMA 基质的全内反射型 mPOF 包层空气孔中填充液晶材料, 首次在 mPOF 中观察到了液晶导致的光子带隙效应及带隙的热可调特性<sup>[13]</sup>. 这为各种可调 mPOF 器件的制备提供了实验指导. 然而, 对于填充液晶的带隙型 mPOF 及其可调特性理论方面的研究尚未见报道.

本文通过在 PMMA 基质、具有三角形晶格结构的 mPOF 包层空气孔中填充 E7 型液晶材料<sup>[14]</sup>, 而获得了带隙型 mPOF. 研究了结构参数及温度对光纤带隙特性的影响. 应用全矢量有限元方

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60437020, 61108061) 和国家高技术研究发展计划 (863) (批准号: 2007AA032452) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: liliwang@opt.ac.cn

法(FEM)<sup>[5,15]</sup> 计算了填充液晶的带隙型 mPOF(LC-mPOF) 的基模有效模场面积, 以及与相同结构未填充液晶的全内反射型 mPOF(TIR-mPOF) 之间的功率耦合效率. 结果表明所设计的 LC-mPOF 具有优良的热可调效应、大的模场面积, 与 TIR-mPOF 具有较高的耦合效率. 研究结论为 mPOF 在温度传感领域的应用及各种可调光纤器件的制备提供了理论参考.

## 2 光纤结构设计及带隙热可调特性

本文设计的 LC-mPOF 的端面结构如图 1 所示, 在 PMMA 基质中, 由四圈三角形排列的填充液晶的空气孔构成光纤包层, 中心处缺少一个空气孔的实心缺陷区构成纤芯.  $\Lambda$  为晶格常数,  $d$  为填充液晶的空气孔直径. 所采用的 LC 为 E7 型液晶 ( $T_c = 58^\circ\text{C}$ ) 材料, 其各向异性可以通过寻常折射率  $n_o$  和反常折射率  $n_e$  来描述<sup>[14]</sup>. 折射率随温

度和波长的变化关系由扩展的 Cauchy 公式表示为

$$n_{o/e}(T, \lambda) = A_{o/e}(T) + \frac{B_{o/e}(T)}{\lambda^2} + \frac{C_{o/e}(T)}{\lambda^4}, \quad (1)$$

其中  $A_{o/e}, B_{o/e}, C_{o/e}$  为 Cauchy 系数. 将 E7 型液晶材料的 Cauchy 系数列于表 1 中.

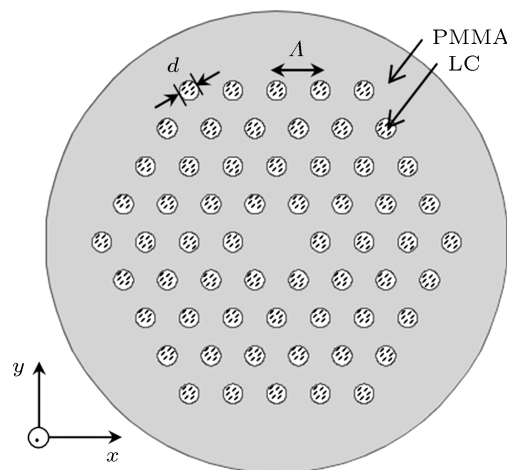


图 1 LC-mPOF 横截面示意图

表 1 E7 型液晶材料的 Cauchy 系数

温度 $T/^\circ\text{C}$	$n_o$			$n_e$		
	$A_o$	$B_o/\mu\text{m}^2$	$C_o/\mu\text{m}^4$	$A_e$	$B_e/\mu\text{m}^2$	$C_e/\mu\text{m}^4$
15	1.5006	0.0065	0.0004	1.7055	0.0087	0.0028
20	1.4998	0.0067	0.0004	1.6993	0.0085	0.0027
25	1.4994	0.0070	0.0004	1.6933	0.0078	0.0028
30	1.4989	0.0072	0.0004	1.6846	0.0090	0.0025
35	1.4987	0.0071	0.0004	1.6761	0.0091	0.0025

由于 E7 型液晶材料 ( $n_o = 1.502, n_e = 1.7@1.55 \mu\text{m}, 25^\circ\text{C}$ ) 的折射率大于基质材料的折射率, 在包层空气孔中填充液晶使光纤的导光机理发生了本质性的变化, 即由原来的全内反射导光转变为光子带隙效应导光. 实验结果表明, 在 PMMA 基质的 mPOF 包层空气孔中填充 E7 型液晶, 与在熔石英基质的微结构光纤中填充该液晶的情况类似, 当温度低于  $T_c$ (向列相) 且无外加电场时, 流动性导致液晶分子沿光纤轴向均匀平行排列<sup>[13,16]</sup>. 此时液晶材料的相对介电常数张量为对角张量,  $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = n_o^2, \varepsilon_{33} = n_e^2$ , 光纤包层的带隙结构与偏振无关<sup>[7,17,18]</sup>. LC-mPOF 的传输特性主要与液

晶材料的寻常折射率  $n_o$  有关. 尽管如此, 我们在计算时, 仍将液晶材料的介电常数张量设置为对角矩阵的形式, 包括了反常折射率  $n_e$  的影响.

在对光纤结构进行设计时, 为了便于液晶材料的填充, 包层空气孔直径不易太小<sup>[13]</sup>, 同时为了保证未填充液晶的光纤能够无限单模传输, 光纤包层的相对孔直径  $d/\Lambda$  应不大于 0.45<sup>[2]</sup>. 首先, 我们采用全矢量有限元方法研究了不同结构参数时周期性包层中的光子带隙特征, 如图 2 所示 (灰色区域表示带隙), 并总结了带隙随结构参数的变化规律. 由图 2(a)—(c) 可以发现, 当晶格常数  $\Lambda$  恒定时, 带隙的位置随孔直径  $d$  的增加而向长波长方

向移动; 由图 2(d)—(f) 可以发现, 当孔直径  $d$  恒定时, 带隙的位置 (中心波长) 几乎不变, 但是带隙随晶格常数  $\Lambda$  的增加而变宽、变浅. 这与 Luan 等人采用平面波方法得出的结论相一致 [19]. 表明带隙的形成是基于高折射率介质柱 (即这里的液晶) 之间的反谐振效应的. 根据这些规律, 通过

合理调整包层结构参数, 可以在特定的波长处获得合适的光子带隙. 对于  $\Lambda = 9 \mu\text{m}$ ,  $d = 4 \mu\text{m}$  的 LC-mPOF, 可以在室温时 ( $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 获得中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ , 宽度约为  $600 \text{ nm}$  的光子带隙. 以下主要对该结构的 LC-mPOF 的热可调特性进行研究.

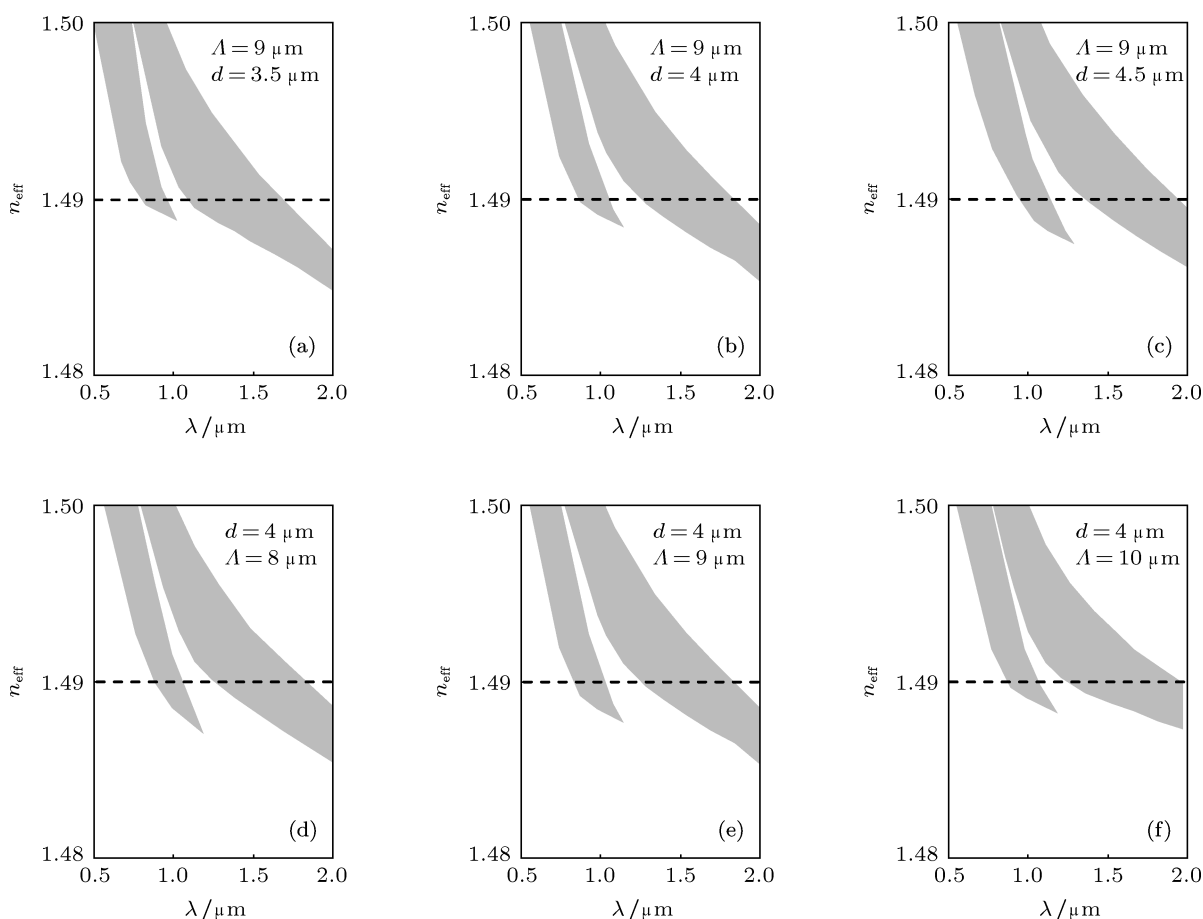


图 2 不同结构参数的光子带隙 ( $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (a)—(c) 为晶格常数  $\Lambda$  恒定, 改变填充液晶的空气孔直径  $d$  获得的带隙结构; (d)—(f) 为填充液晶的空气孔直径  $d$  恒定, 改变晶格常数  $\Lambda$  获得的带隙结构

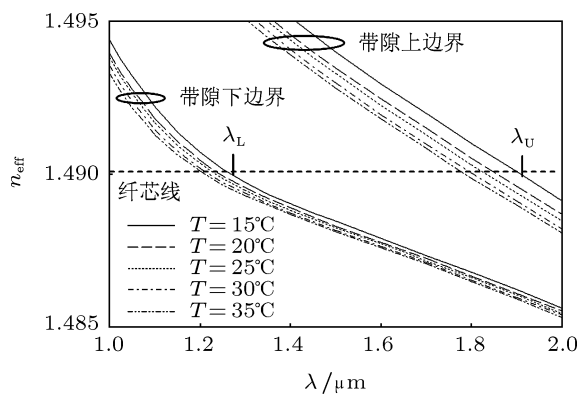


图 3 LC-mPOF 带隙随温度的变化

为了研究该 LC-mPOF 带隙的热可调特性, 我们计算了不同温度时周期性包层结构的光子带隙. 图 3 给出了所设计的 LC-mPOF 包层第一带隙随温度的变化. 带隙的上、下边界 (表示为有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随波长的变化) 与纤芯线 (PMMA 的折射率) 的交点波长  $\lambda_U$ ,  $\lambda_L$  决定了带隙的宽度. 随着温度由  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  增加到  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , 带隙向短波长方向移动 (上、下边界分别由  $1.9 \mu\text{m}$  和  $1.26 \mu\text{m}$  移动到  $1.79 \mu\text{m}$  和  $1.21 \mu\text{m}$ ). 而且温度变化对带隙上边界的影响更加显著, 从而导致带隙随温度的增加而变窄. 带隙的蓝移主要是由于在  $15\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$  范围之

内, E7 型液晶材料的寻常折射率具有负的温度梯度 ( $dn_0/dT < 0$ ) 而导致的. 带隙上、下边界的温度灵敏度之间的差异可以用反谐振反射式光波导模型<sup>[6,20]</sup>来解释. 根据反谐振模型, 周期性包层结构的带隙边界由其中高折射率部分 (即这里的 E7 型液晶材料) 的截止波长决定. 由于液晶材料寻常折射率随温度的变化导致带隙的上下边界发生等量的相对移动, 所以带隙上边界 (长波长) 处的绝对移动量更大. 对于所设计的 LC-mPOF, 带隙上边界的温度灵敏度可达到  $-5.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

### 3 LC-mPOF 特性分析

通常情况下, LC-mPOF 与相连接的 TIR-mPOF 具有不同的模场面积, 即使是与相同结构未填充液晶的 mPOF 连接, 由于导光机理不同, 二者的模场面积也不相同. 对于 LC-mPOF 器件, 插入损耗

主要源于 LC-mPOF 与 TIR-mPOF 模场面积失配带来的耦合损耗<sup>[21]</sup>. 为了研究 LC-mPOF 与 TIR-mPOF 之间的耦合损耗, 我们应用 FEM 对所设计 LC-mPOF ( $\Lambda = 9 \mu\text{m}$ ,  $d = 4 \mu\text{m}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ ) 在第一带隙之内的模场特性进行了分析. 图 4 给出了 LC-mPOF 在带隙边缘处 ( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ) 和带隙中心处 ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ) 的基模模场分布, 以及相同结构未填充液晶的 TIR-mPOF 在  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时的基模模场分布. 在带隙边缘处, LC-mPOF 的包层无法将基模限制在纤芯中, 有很大一部分能量扩散到了包层中, 如图 4(a) 所示; 在带隙中心波长附近, 基模的大部分能量都限制在纤芯中传输, 但仍有一部分能量分布在纤芯周围的第一圈高折射率介质 (液晶) 中, 如图 4(b) 所示; 然而, 具有相同结构参数、相同传输波长未填充液晶的 TIR-mPOF 的基模模场却被完全限制在纤芯区域, 如图 4(c) 所示.

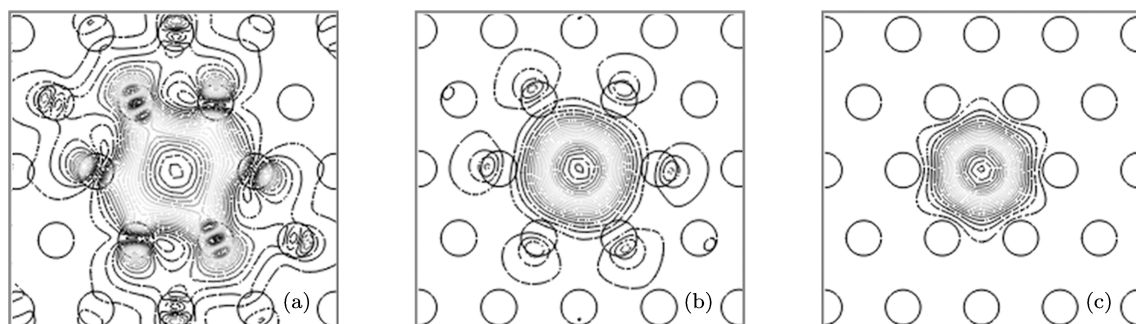


图 4 基模模场分布等高线图 (a) LC-mPOF 带隙边缘处 ( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ) 的光强分布; (b) LC-mPOF 带隙中心处 ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ) 的光强分布; (c)  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  时 TIR-mPOF 的光强分布

通过电场强度在光纤横截面内的分布  $E(x, y)$  可以计算出有基模有效模场面积  $A_{\text{eff}}$ <sup>[21]</sup> 为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^4 dx dy}. \quad (2)$$

图 5 给出了 LC-mPOF 和 TIR-mPOF 的基模有效模场面积随传输波长的变化关系. 对于 LC-mPOF, 在带隙的中心波长附近, 由于基模模场被较好的限制在纤芯中,  $A_{\text{eff}}$  达到最小值.  $1.55 \mu\text{m}$  处的有效模场面积为  $218 \mu\text{m}^2$ . 在接近带隙边缘的区域, 由于模场向包层扩散而导致  $A_{\text{eff}}$  增加. 当  $A_{\text{eff}}$  突

然急剧增加时 (在波长  $1.2\text{--}1.3 \mu\text{m}$  之间), 说明模场的大部分能量已经扩散到了包层中, 即传输波长达到了带隙边缘. 由模场面积随波长的变化来判断带隙位置和由实际的无限大包层结构中计算得出的带隙位置符合得很好. 对于未填充液晶的 TIR-mPOF, 由于结构参数的设置满足无限单模传输条件, 基模模场能够很好的限制在纤芯中. 其  $A_{\text{eff}}$  随波长的增加略有增加, 但总是小于 LC-mPOF 的模场面积. LC-mPOF 与 TIR-mPOF 相连接时, 功率耦合系数<sup>[21]</sup>  $T$  可以近似表示为

$$T \approx \frac{4A_{\text{eff},1}A_{\text{eff},2}}{(A_{\text{eff},1} + A_{\text{eff},2})^2}, \quad (3)$$

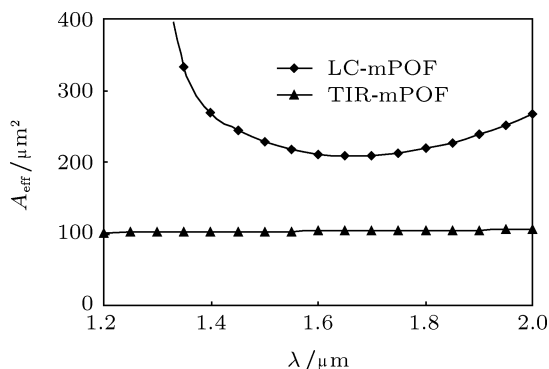


图5 LC-mPOF 和 TIR-mPOF 在第一带隙之内的基模有效模场面积  $A_{\text{eff}}$

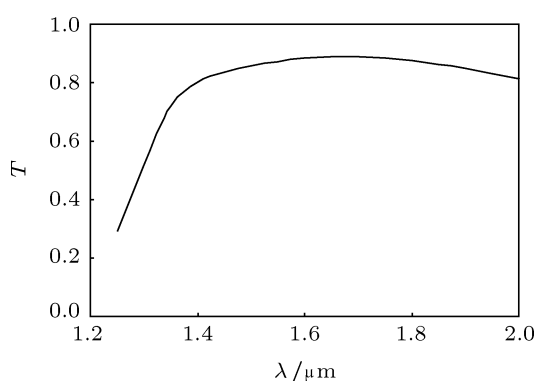


图6 LC-mPOF 和 TIR-mPOF 的功率耦合系数  $T$  随传输波长的变化关系

其中  $A_{\text{eff},1}$  和  $A_{\text{eff},2}$  分别表示 LC-mPOF 和 TIR-mPOF 的基模有效模场面积. 图 6 给出了 LC-mPOF 和相同结构未填充液晶的 TIR-mPOF 连接时功率耦合系数  $T$  随传输波长的变化关系. 在带隙的中心

波长附近, 耦合效率最高,  $1.55 \mu\text{m}$  处的耦合效率可达 0.873. 如果仅从两根互连光纤模场面积失配带来的耦合损耗的角度考虑, 我们设计的 LC-mPOF, 工作在带隙中心波长附近时, 可以将大部分的能量有效地耦合进入未填充液晶的光纤进行传输.

## 4 结论

通过在 mPOF 的包层空气孔中填充液晶材料获得了带隙型 LC-mPOF. 通过研究带隙随结构参数的变化规律发现, 当包层晶格常数恒定时, 带隙的位置随填充液晶的空气孔直径的增加而向长波长方向移动; 当孔直径恒定时, 带隙的位置几乎不变, 但是随晶格常数的增加而变宽、变浅. 对所设计的 LC-mPOF 热可调特性的研究结果表明, 在  $15\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$  范围之内, 第一带隙随温度的增加发生显著的蓝移, 带隙上边界的温度灵敏度可以达到  $-5.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . 设计出室温时在  $1.55 \mu\text{m}$  附近具有约  $600 \text{ nm}$  带宽的 LC-mPOF. 在带隙的中心波长附近, 基模模场被较好的限制在纤芯中,  $1.55 \mu\text{m}$  处可以获得  $218 \mu\text{m}^2$  的大有效模场面积. 由模场面积随波长的变化来判断带隙位置和由实际的无限大包层结构中计算得出的带隙位置符合得很好. 研究了 LC-mPOF 和相同结构未填充液晶的 TIR-mPOF 连接时的功率耦合效率. 结果表明我们设计的 LC-mPOF, 工作在带隙中心波长附近时可以将大部分的能量有效地耦合进入 TIR-mPOF 进行传输. 研究结论为 mPOF 在温度传感领域的应用及各种可调光纤器件的制备提供了理论参考.

- [1] Russell P St J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4729
- [2] Birks T A, Knight J C, Russell P St J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [3] Mortensen N A, Nielsen M D, Folkner J R, Petersson A, Simonsen H R 2003 *Opt. Lett.* **28** 393
- [4] Li Y F, Wang Q Y, Hu M L, Li S G, Liu X D, Hou L T 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1396 (in Chinese) [栗岩峰, 王清月, 胡明列, 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田 2004 物理学报 **53** 1396]
- [5] Wang D D, Wang L L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3255 (in Chinese) [王豆豆, 王丽莉 2008 物理学报 **59** 3255]
- [6] Alkeskjold T T, Lægsgaard J, Bjarklev A, Hermann D S, Broeng J, Li J 2006 *Appl. Opt.* **45** 2261
- [7] Ren G B, Shum P, Hu J J, Yu X, Gong Y D 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 3650
- [8] Larsen T T, Bjarklev A, Hermann D S, Broeng J 2003 *Opt. Express* **11** 2589
- [9] Argyros A 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 1571
- [10] Wang J, Yang X H, Wang L L 2008 *Opt. Express* **16** 7703
- [11] Kong D P, Wang L L 2009 *Opt. Lett.* **34** 2435
- [12] Yang X H, Wang L L 2007 *Opt. Express* **15** 16478
- [13] Yuan W, Wei L, Alkeskjold T T, Bjarklev A, Bang O 2009 *Opt. Express* **17** 19356
- [14] Li J, Wu S T, Brugioni S, Meucci R, Faetti S 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 073501
- [15] Saitoh K, Koshida M 2003 *Opt. Express* **11** 3100
- [16] Ertman S, Wolinski T R, Pysz D, Buczynski R, Kruszelnicki E N, Dabrowski R 2009 *Opt. Express* **17** 19298
- [17] Hsu S M, Chang H C 2008 *Opt. Express* **16** 21355
- [18] Hu J J, Shum P, Ren G B, Yu X, Wang G H, Lu C, Ertman S, Wolinski T R 2008 *Opt. Commun.* **281** 4339
- [19] Luan F, George A K, Hedley T D, Pearce G J, Bird D M, Knight J

C, Russell P St J 2004 *Opt. Lett.* **29** 2369  
[20] Li Y F, Hu X K, Wang A M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 064212 (in

Chinese) [栗岩峰, 胡晓堃, 王爱民 2011 物理学报 **60** 064212]  
[21] Mortensen N A 2002 *Opt. Express* **10** 341

# Design and analysis of thermally tunable liquid-crystal-filled microstructured polymer optical fiber\*

Wang Dou-Dou Wang Li-Li<sup>†</sup> Li Dong-Dong

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(Received 29 August 2011; revised manuscript received 22 September 2011)

## Abstract

A highly tunable bandgap-guiding microstructured polymer optical fiber (mPOF) is designed by infiltrating the cladding air holes with a liquid crystal. Bandgap is blue shifted as temperature is increased. A high thermal tuning sensitivity of  $-5.5 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  is achieved at the long-wavelength edge of the bandgap. Mode properties and effective mode area of the fundamental mode are investigated by using the full-vector finite element method. The designed fiber has a large effective area and high power transmission coefficient between the index guiding modes and the bandgap guiding modes. Our results provide theoretical references for applications of mPOF in sensing and tunable fiber-optic devices.

**Keywords:** microstructured polymer optical fiber, liquid crystal, photonic bandgap, finite element method

**PACS:** 81.05.Lg, 42.70.Qs, 42.79.Kr

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60437020, 61108061), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA032452).

<sup>†</sup> E-mail: liliwang@opt.ac.cn