

液晶光子晶体光纤的设计及热调谐特性分析

王豆豆, 李百宏, 齐兵, 强蕊

西安科技大学理学院, 陕西 西安 710054

摘要 通过在实芯光子晶体光纤的包层空气孔中填充 5CB 型液晶, 设计出了在室温附近具有高热调谐灵敏度的光子带隙型液晶光子晶体光纤。采用有限元方法研究了光子带隙随光纤结构参数的变化规律、光子带隙位置的热调谐特性、光纤限制损耗随包层孔圈数的变化以及限制损耗的热调谐特性。结果表明, 该光子晶体光纤光子带隙的位置主要由包层孔直径决定, 其限制损耗随包层孔圈数的增加而显著降低; 随着温度由 25.1 °C 增加至 34.8 °C, 光子带隙位置和限制损耗曲线均发生红移, 限制损耗的最小值位置处的平均热调谐灵敏度约为 10.3 nm/°C; 在光子带隙的中心波长附近, 该光子带隙型液晶光子晶体光纤和相同结构未填充液晶的光纤之间具有高耦合效率。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 有限元方法; 液晶; 热调谐特性

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.030602

Design for Liquid Crystal Photonic Crystal Fiber and Thermal Tuning Characteristic Analysis

Wang Doudou, Li Baihong, Qi Bing, Qiang Rui

College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract A photonic bandgap type liquid crystal photonic crystal fiber with high thermal tuning sensitivity around room temperature is designed when we fill the cladding air holes of solid-core photonic crystal fiber with liquid crystal of 5CB type. The variation in photonic bandgap with fiber structure parameters, the thermal tuning characteristic of the position of photonic bandgap, the variation in fiber confinement loss with cladding hole ring number and the thermal tuning characteristic of confinement loss are investigated by the finite element method. The results show that the photonic bandgap position of photonic crystal fiber depends strongly on cladding hole diameter. The confinement loss decreases as the ring number of cladding hole increases. The photonic bandgap position and the confinement loss curve are red shifted, and the average thermal tuning sensitivity of 10.3 nm/°C is achieved at the position of the minimum confinement loss when the temperature increases from 25.1 °C to 34.8 °C. Around the central wavelength of photonic bandgap, a high coupling efficiency between the photonic bandgap type liquid crystal photonic crystal fiber and the fiber with the same structure unfilled with liquid crystal is obtained.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; finite element method; liquid crystal; thermal tuning characteristic

OCIS codes 060.2310; 060.5295; 060.2400; 060.2370

1 引言

光子晶体光纤(PCF)也称作微结构光纤,其包层中沿轴向排列着周期性微结构空气孔,具有较好的传输特性,自问世以来一直备受关注^[1]。根据导光机理的不同,可以将 PCF 分为全内反射(TIR)型和光子带隙(PBG)型两大类。与传统光纤相比,PCF 的结构设计更加灵活。通过改变包层空气孔的形状、尺寸、排列方式和数目,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,以及可控的偏振和色散特

收稿日期: 2016-10-17; **收到修改稿日期:** 2016-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(11604260,11504292)、中国博士后科学基金(2015M582766XB)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JQ8335)、陕西省教育厅科研计划(16JK1516)

作者简介: 王豆豆(1982—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光子晶体光纤的理论、设计和制备等方面的研究。

E-mail: wangdoudou@xust.edu.cn

性等^[2-3]。但是,一旦拉制完成,PCF的传输特性便无法改变,PCF的这种特性限制了其在可调谐功能器件及传感领域的应用。鉴于PCF的纤芯周围排布着大量的空气孔道,在这些空气孔道中填充对外部环境(如温度、电/磁场和压力等)敏感的材料便可以灵活控制PCF的传输特性^[4-6]。当填充材料的折射率大于实芯PCF的基材折射率时,可以将全内反射型PCF(TIR-PCF)转变为光子带隙型PCF(PBG-PCF)。向列相液晶(LC)具有高双折射、灵敏的热调谐和电调谐等优良特性,成为基于PCF的可调谐光纤器件(如阈值开关、可调双折射控制器和可调滤波器)的常用填充材料^[7-8]。这类基于PCF的可调谐光纤器件具有极小的插入损耗,并且可以在最小的外部环境因素影响下获得较好的调谐特性,为小体积、高性能光学器件的研制提供了契机。

Larsen等^[9]于2003年报道了基于液晶填充光子晶体光纤(LC-PCF)的光功能器件,并指出了其在全光信号处理和生物传感领域的潜在应用前景。随后,出现了较多针对LC-PCF的热调谐和电调谐特性的理论和实验研究。Alkeskjold等^[10]在大模场面积PCF中分别填充商业液晶E7和由Li等^[11]配制的液晶混合物UCF-1,得到了两种LC-PCF,后者由于所填充液晶的清亮点温度较低($T_c=29.7\text{ }^\circ\text{C}$)且在室温附近具有高寻常折射率温度梯度(dn_o/dT),获得了 $27\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的高热调谐灵敏度。Noordegraaf等^[12]制作了基于光子带隙交叉作用的LC-PCF陷波滤波器,该滤波器具有 $-2.5\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的热调谐性;采用有限元(FEM)方法模拟了该滤波器的透射光谱,模拟结果与实验结果一致。Hu等^[13]分别采用标量解析方法和平面波展开法研究了温度对LC-PCF的光子带隙位置和带宽的影响,由于忽略了5CB液晶的材料色散,理论模拟结果与实验结果存在一定的差异。已报道的文献中多数是研究在固定结构参数的PCF内填充某种液晶后的调谐特性,关于LC-PCF的传输特性随结构参数和外界调制因素的变化规律尚未见详细报道。

本文设计了一种石英基质、三角形晶格结构、填充5CB型液晶的光子带隙型LC-PCF。采用有限元方法^[14]研究了该LC-PCF的光子带隙随光纤结构参数的变化规律、光子带隙的热调谐特性、模场特性和限制损耗等。结果表明,所设计的LC-PCF在室温附近具有高热调谐灵敏度和低限制损耗,与TIR-PCF之间具有高耦合效率。

2 LC-PCF 设计

2.1 光纤结构设计

图1为设计的LC-PCF的横截面示意图。在石英基质中,光纤包层是由按照三角形晶格结构(晶格常数为 Λ)排列的圆形孔(孔直径为 d)构成的,纤芯是由中心处缺少一个孔的实心缺陷区构成的,包层孔中填充5CB型液晶。由于5CB型液晶的折射率(当波长为 589 nm ,温度为 $25.4\text{ }^\circ\text{C}$ 时,寻常折射率 $n_o=1.5361$,非寻常折射率 $n_e=1.7124$)^[15-16]大于石英基质的折射率($n=1.45$),光纤包层的等效折射率大于芯区的折射率,使得该LC-PCF可以基于光子带隙效应进行导光。实验中制作LC-PCF时通常在一根PCF的一端通过毛细管

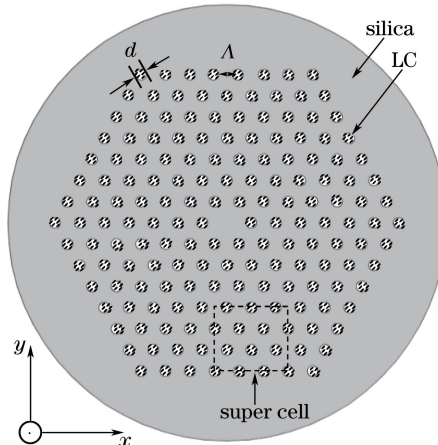


图1 LC-PCF横截面示意图

Fig. 1 Cross section diagram of LC-PCF

力实现液晶材料的填充,填充长度约几厘米,对于未填充液晶的部分则基于改进的全内反射原理进行导光。

在设计光纤结构参数时,需要综合考虑以下几点:1)为了使未填充液晶的 TIR-PCF 能够进行无截止单模传输,光纤包层的相对孔直径 d/Λ 应小于 0.45^[17];2)为了减小光纤的传输损耗,应该使光子带隙的位置与基材的低损耗窗口一致,光子带隙随结构参数的变化规律及其缩放特性将在 3.1 节中讨论;3)对于使用高折射率材料填充的实芯光子带隙型 PCF,其限制损耗与包层孔圈数密切相关,3.4 节中研究了限制损耗随包层孔圈数的变化规律。对于所设计的 LC-PCF,为了获得小于 0.01 dB/m 的限制损耗,要求含有 7 圈包层孔。

2.2 液晶的折射率

利用向列相液晶折射率随温度变化的性质来设计得到热可调特性的 LC-PCF,其热调谐特性主要取决于液晶的寻常折射率温度梯度 dn_o/dT ^[10]。对于通过电阻加热或者光抽运的方式来实现温度控制的 LC-PCF,在室温附近获得高调谐灵敏度将有效降低功耗且操作方便。因此,需要选择一种在室温附近具有高 dn_o/dT 的液晶作为 PCF 的填充材料。

在众多的液晶材料中,商业液晶单体 5CB 具有结构简单、光化学性能稳定和清亮点温度较低 ($T_c=35.3\text{ }^\circ\text{C}$) 等特性,向列相液晶温度范围为 $22.0\sim 35.3\text{ }^\circ\text{C}$,在室温附近得到的 dn_o/dT 较大。此外,关于 5CB 的折射率随温度和波长的变化规律有详实的文献报道^[15-16],这些报道提供了可靠的实验数据和理论模型,因此选择 5CB 型液晶作为 PCF 的填充材料。表示向列相 5CB 各向异性的寻常折射率 n_o 和非寻常折射率 n_e 随温度和波长的变化关系可以由扩展的 Cauchy 公式表示^[15],该公式可以拓展到红外波段^[16]:

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

式中 $A_{o/e}$ 、 $B_{o/e}$ 、 $C_{o/e}$ 为 Li 等^[11]根据实验结果拟合出的 5CB 的 Cauchy 系数,如表 1 所示。

表 1 5CB 型液晶 Cauchy 系数的实验拟合结果^[15]

Table 1 Experimental fitting results of Cauchy coefficient for 5CB type liquid crystal^[15]

Temperature $T / ^\circ\text{C}$	n_o			n_e		
	A_o	$B_o / \mu\text{m}^2$	$C_o / \mu\text{m}^4$	A_e	$B_e / \mu\text{m}^2$	$C_e / \mu\text{m}^4$
25.1	1.67946	0.00482	0.00273	1.51866	0.00163	0.00114
29.9	1.67030	0.00462	0.00257	1.52012	0.00158	0.00121
32.6	1.65866	0.00440	0.00248	1.52369	0.00174	0.00125
34.8	1.64304	0.00380	0.00217	1.53028	0.00183	0.00135
36.1	1.57209	0.00210	0.00161	1.57209	0.00210	0.00161

Alkeskjold 等^[18]的实验结果表明,当温度低于 T_c 且在垂直于光纤方向无外加电(磁)场时,液晶流动特性和表面锚泊作用使得填充在 PCF 包层孔道中的液晶与填充在毛细管(内径为 $2\sim 6\text{ }\mu\text{m}$)中的液晶情况类似,其分子主要沿光纤轴向均匀平行排列以减小自由能(或者通过合适的锚泊条件来实现液晶分子的定向排列)。此时,向列相液晶材料的相对介电常数张量为对角张量, $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = n_o^2$, $\epsilon_{33} = n_e^2$, ϵ_{11} 、 ϵ_{22} 和 ϵ_{33} 为相对介电常数张量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 的元素。光纤包层的光子带隙结构与偏振无关^[19]。LC-PCF 的传输特性主要与液晶材料的 n_o 有关。尽管如此,模拟时仍将液晶材料的介电常数张量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 设置为对角矩阵的形式,并考虑了非寻常折射率 n_e 的影响。

3 结果与讨论

采用 FEM 方法,对所设计的 LC-PCF 的光子带隙特性和导模特性进行了系统研究。在模拟过程中,液晶的折射率随温度和波长的变化关系由(1)式给出。

3.1 光子带隙随光纤结构参数的变化规律

在计算无限大包层结构(即石英基质中以三角形晶格周期排列的液晶柱)的光子带隙时,选取了图 1 所示的包含 3×3 个原胞的超胞结构,并结合对称性边界条件(上、下边界和左、右边界分别采用完美磁导体和完美电导体作为边界条件)^[20],求解该结构中允许存在的、有效折射率在 1.45 附近的全部本征模式,不存在模式的区域即为包层的光子带隙。随着超胞由含 1×1 个原胞增加到含 3×3 个原胞,光子带隙的位置几乎不改变,但光子带隙宽度有所减小;继续增大超胞,计算结果趋于收敛。为节约计算时间,采取 3×3 结构的

超胞来初步寻找光子带隙,光子带隙最终将由限制损耗特性决定。

图2为温度为 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同结构参数的周期性包层的光子带隙。对于某组给定的结构参数,相应的光子带隙上、下边界线(表示为有效折射率 n_{eff} 随归一化波长 λ/Λ 的变化)之间的区域(如蓝色阴影)表示其光子带隙,水平纤芯线对应于石英的折射率,光子带隙边界线与纤芯线的交点决定了光子带隙的宽度和位置。第一光子带隙(基带隙)对应的波长最长,其他为高阶光子带隙,图中仅显示了具有足够带宽的第一光子带隙和第二光子带隙。由图2(a)可以看出,由于(1)式决定了5CB的材料色散随波长的增加而减小,短波长区域的材料色散对光子带隙的影响较为明显,如第二光子带隙下边界;长波长区域的材料色散对光子带隙的影响几乎可以忽略,如第一光子带隙上边界。对于 $d/\Lambda=0.43$ 的包层结构,其第一、二光子带隙中心对应的归一化波长分别在0.38和0.21附近。通过缩放光纤横截面尺寸,可以将光子带隙移动到合适的波长附近。由图2(b)可知,当孔直径 d 恒定时,光子带隙的位置几乎不随晶格常数 Λ 的变化而变化(图中的横坐标是对 Λ 进行了归一化),这与Luan等^[21]采用平面波方法得出的结论一致,表明光子带隙的形成是基于高折射率介质柱(即液晶)之间的反谐振效应。图2(c)为晶格常数 Λ 恒定时光子带隙位置随孔直径 d 的变化情况。可以看出,增加 d 可以使光子带隙发生显著的红移。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。

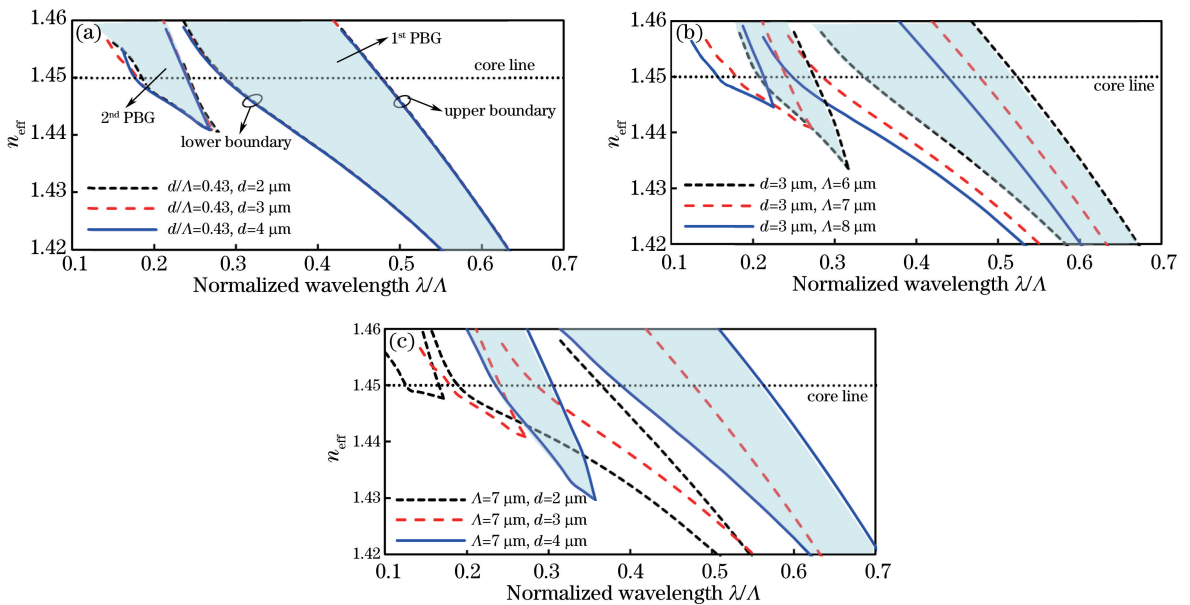


图2 不同结构参数对应的光子带隙($T=25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)。(a) d/Λ 恒定,改变 d ;
(b) d 恒定,改变 Λ ;(c) Λ 恒定,改变 d

Fig. 2 PBGs with different structural parameters at $T=25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. (a) d/Λ is fixed and d is changing;
(b) d is fixed and Λ is changing; (c) Λ is fixed and d is changing

3.2 光子带隙的热可调特性

对于 $\Lambda=7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d/\Lambda=0.43$ 的周期性包层结构,不同温度时的光子带隙结构如图3所示,蓝色阴影区域表示 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的光子带隙。可以看出,随着温度由 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $34.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,光子带隙发生红移且变宽,温度越接近液晶的 $T_c(35.3\text{ }^{\circ}\text{C})$,光子带隙随温度的这种变化趋势越显著。光子带隙的红移主要是由于5CB液晶具有正寻常折射率温度梯度(即 $dn_o/dT>0$),随着温度趋近 T_c ,液晶与石英基质之间的折射率差增大,具体可以用反谐振反射式光波导(ARROW)理论来解释^[4,22]。根据ARROW理论,周期性包层结构的光子带隙边界由高折射率介质柱(即5CB液晶柱)中各导模的截止波长决定,即同一光子带隙的长/短波长边界分别由液晶柱中的低/高阶导模决定。固定 d/Λ ,增加液晶柱的折射率,即增加了液晶柱和石英基质之间的折射率差,导致液晶柱中的低/高阶导模的截止波长发生等量的相对红移^[10,22]。因此,光子带隙结构整体发生红移的同时,上边界处光子带隙产生较大的绝对移动量,该结论与文献报道的实验结果一致^[10]。对于所设计的LC-PCF,第一光子带隙和第二光子带隙上边界的平均热调谐灵敏度分别为 $20.6\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 和 $10.3\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

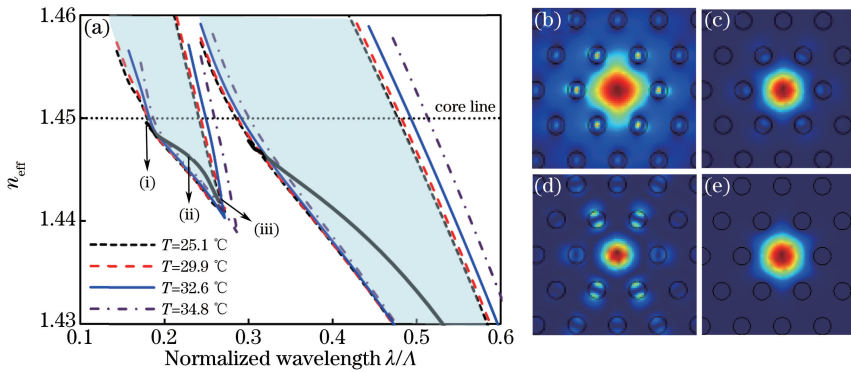


图 3 (a)不同温度时的光子带隙;第二光子带隙的(b)短波长边缘、(c)中心波长、(d)长波长边缘的基模模场;
(e)未填充液晶的 TIR-PCF 的基模模场

Fig. 3 (a) PBGs at different temperatures; mode field of fundamental mode of (b) short wavelength edge, (c) central wavelength and (d) long wavelength edge of 2th PBG; (e) mode field of fundamental mode of TIR-PCF unfilled with liquid crystal

3.3 LC-PCF 的导模特性

通常情况下,LC-PCF 与相连接的 TIR-PCF 或者普通单模光纤具有不同的模场面积,即使是与相同结构未填充液晶的 PCF 连接,由于导光机理不同,二者的模场面积也不同。因此,LC-PCF 器件的插入损耗主要源于互连光纤间模场面积失配带来的耦合损耗。图 3(a)为 25.1 °C 时 LC-PCF 的基模色散曲线(黑色粗实线)和第二光子带隙短波长边缘[图 3(b)]、中心波长[图 3(c)]和长波长边缘[图 3(d)](分别对应于 i、ii 和 iii 处的波长)处的基模模场分布。由图 3(c)可以看出,在第二光子带隙的中心波长($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)附近,光子带隙效应使得基模的大部分能量被限制在纤芯中传输,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柱(即液晶)中。未填充液晶且传输波长同样为 $1.55 \mu\text{m}$ 的 TIR-PCF 基模模场分布如图 3(e)所示。比较图 3(c)、(e)可以发现,尽管具有相同的结构参数和传输波长,但是由于导光机理不同,基模模场分布也不同。在光子带隙中心波长处,基模被较好地束缚在纤芯中传输,近似呈高斯分布,可以用 Mortensen^[17] 提出的功率耦合系数来衡量 LC-PCF 与 TIR-PCF 之间的接续损耗。所设计的 LC-PCF 在第一、二光子带隙中心波长处的功率耦合系数分别为 0.94 和 0.97,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,该 LC-PCF 工作在光子带隙中心波长附近时,可以将大部分能量有效地耦合进入未填充液晶的光纤。

3.4 LC-PCF 的限制损耗及其热可调特性

对于实际制作的 PCF,其包层孔圈数总是有限的,由模式泄漏导致的限制损耗是固有的,限制损耗可以由模式有效折射率的虚部给出:

$$\eta_{\text{cl}} = 8.686 \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (2)$$

式中限制损耗 η_{cl} 的单位为 dB/m, Im 表示虚部。

图 4 为 25.1 °C 时含有不同包层孔圈数的 LC-PCF 的基模限制损耗。光子带隙中心附近的限制损耗达到最小值时,光子带隙边缘处的限制损耗急剧增加。同时,限制损耗随着包层孔圈数的增加而显著降低。当包层含有 7 圈填充液晶的孔时,第一、二光子带隙中获得的最小限制损耗分别为 0.33 dB/m 和 0.02 dB/m,表明位于短波长(高频)处的高阶光子带隙对基模的束缚能力优于基带隙,在第二光子带隙中心附近获得了比第一光子带隙低一个数量级的限制损耗。色散曲线(对应于基模有效折射率实部)和限制损耗最小值的位置(取决于液晶柱的散射特性)几乎不随包层孔圈数的变化而改变。以上结论与 White 等^[23] 基于 ARROW 理论并采用全矢量多极法对高折射率介质柱填充的光子带隙型 PCF 的限制损耗特性的研究结果一致。基于该结论,通过限制损耗曲线便可确定光子带隙的范围和光纤透射谱的峰值位置。图 5 为 LC-PCF(含 7 圈包层孔)限制损耗随温度的变化。可以看出,限制损耗随温度的变化规律与光子带隙随温度的变化规律相吻合,呈现出明显的热调谐特性。随着温度由 25.1 °C 增加到 34.8 °C,两个光子带隙内限制损耗最小值位置(对应于透射谱的峰值位置)处的平均热调谐灵敏度约为 $10.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,第二光子带隙由于波长短而具有较大

的相对热调谐灵敏度。5CB 较低的 T_c 和室温附近较高的 dn_o/dT 使得所设计的 LC-PCF 在室温附近获得了高热调谐灵敏度。

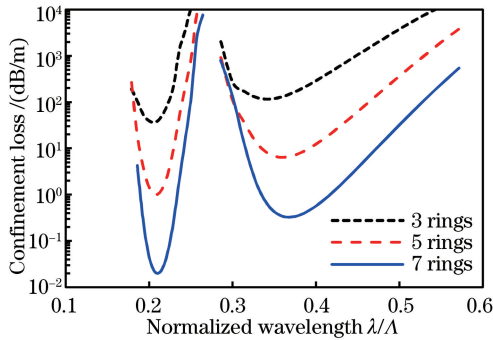


图 4 限制损耗随包层孔圈数的变化

Fig. 4 Variation in confinement loss with cladding hole ring number

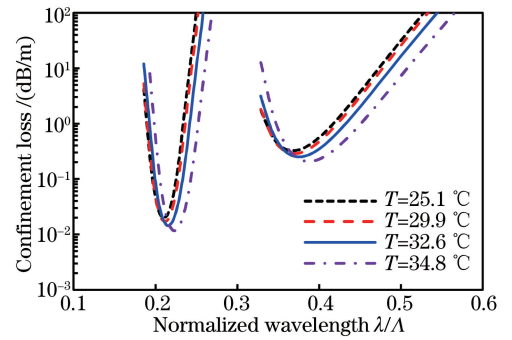


图 5 限制损耗随温度的变化

Fig. 5 Variation in confinement loss with temperature

4 结 论

通过在实芯 TIR-PCF 的包层空气孔中填充高折射率的向列相液晶 5CB, 设计出了在室温附近 (25.1~34.8 °C) 具有高热调谐灵敏度的光子带隙型 LC-PCF。通过研究光子带隙随结构参数的变化规律, 发现光子带隙的形成是基于高折射率液晶柱之间的反谐振效应的, 光子带隙的位置主要由包层孔直径决定。通过等比例缩放光纤横截面, 可以在特定波长处获得光子带隙。在所研究的温度范围内, 向列相液晶 5CB 的寻常折射率温度梯度大于 0, 光子带隙随着温度的增加发生红移。通过增加包层孔圈数, 可以显著降低 LC-PCF 的限制损耗, 但不会改变限制损耗最小值 (对应于透射谱的峰值) 的位置, 其平均热调谐灵敏度约为 10.3 nm/°C。在光子带隙的中心波长附近, LC-PCF 的基模模场被较好的限制在纤芯区域, LC-PCF 和互连单模光纤 (相同结构未填充液晶的 TIR-PCF) 之间具有高耦合效率 (低接续损耗)。该研究为 LC-PCF 在温度传感领域的应用及各种可调光纤器件的制作提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] Russell P S J. Photonic-crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4729-4749.
- [2] Mortensen N A, Nielsen M D, Folkenberg J R, *et al.* Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 393-395.
- [3] Zhao Xingtao, Liu Xiaoxu, Wang Shutao, *et al.* Phase-matching characteristic of photonic crystal fiber with three zero-dispersion wavelengths[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906007.
赵兴涛, 刘晓旭, 王书涛, 等. 三个零色散波长光子晶体光纤及相位匹配特性[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906007.
- [4] Kuhlmeier B T, Eggleton B J, Wu D K C. Fluid-filled solid-core photonic bandgap fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1617-1630.
- [5] Chen HuiFang, Yan Huimin, Shan Guofeng. Design of two-dimensional bending vector sensor based on selective infiltration of photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0105003.
陈慧芳, 严惠民, 单国峰. 基于选择填充光子晶体光纤的二维弯曲矢量传感器设计[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0105003.
- [6] Liu Jianfei, Liu Fan, Zeng Xiangye, *et al.* Sensing characteristics of photonic crystal fiber filled with magnetic fluid[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070601.
刘剑飞, 刘帆, 曾祥烨, 等. 基于磁流体填充的光子晶体光纤传感特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070601.
- [7] Wei L, Alkeskjold T T, Bjarklev A. Tunable and rotatable polarization controller using photonic crystal fiber filled with liquid crystal[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(24): 241104.
- [8] Wei L, Alkeskjold T T, Bjarklev A. Electrically tunable bandpass filter using solid-core photonic crystal fibers filled

- with multiple liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1608-1610.
- [9] Larsen T T, Bjarklev A, Hermann D S, *et al.* Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres[J]. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2589-2596.
- [10] Alkeskjold T T, Lægsgaard J, Bjarklev A, *et al.* Highly tunable large-core single-mode liquid-crystal photonic bandgap fiber[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2261-2264.
- [11] Li J, Gauza S, Wu S T. High temperature-gradient refractive index liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 2002-2010.
- [12] Noordegraaf D, Scolari L, Lægsgaard J, *et al.* Avoided-crossing-based liquid-crystal photonic-bandgap notch filter[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 986-988.
- [13] Hu J J, Shum P, Ren G B, *et al.* Investigation of thermal influence on the bandgap properties of liquid-crystal photonic crystal fibers[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(17): 4339-4342.
- [14] Saitoh K, Koshihara M. Leakage loss and group velocity dispersion in air-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2003, 11(23): 3100-3109.
- [15] Li J, Wu S T. Extended Cauchy equations for the refractive indices of liquid crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(3): 896-901.
- [16] Li J, Wu S T, Brugioni S, *et al.* Infrared refractive indices of liquid crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(7): 073501.
- [17] Mortensen N A. Effective area of photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2002, 10(7): 341-348.
- [18] Alkeskjold T T, Lægsgaard J, Bjarklev A, *et al.* All-optical modulation in dye-doped nematic liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(24): 5857-5871.
- [19] Ren G B, Shum P, Hu J J, *et al.* Polarization-dependent bandgap splitting and mode guiding in liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(22): 3650-3659.
- [20] Obayya S S A, Rahman B M A, Grattan K T V. Accurate finite element modal solution of photonic crystal fibres[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2005, 152(5): 241-246.
- [21] Luan F, George A K, Hedley T D, *et al.* All-solid photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2369-2371.
- [22] Litchinitser N, Dunn S, Steinvurzel P, *et al.* Application of an ARROW model for designing tunable photonic devices [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1540-1550.
- [23] White T P, McPhedran R C, de Sterke C M, *et al.* Resonance and scattering in microstructured optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1977-1979.