

液晶填充光纤 U 型腔的偏振光谱及温度特性

马宽明, 刘梓轩, 刘培元, 李杰*, 武创, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 511486

摘要 将向列相液晶(E7)与光纤 U 型腔相结合,通过外加电场对液晶分子进行取向,分别获得了寻常光和非寻常光的干涉光谱,并获得了其不同的温度系数特性。实验发现:在液晶清亮点以下时,随着温度的升高,非寻常光的干涉光谱向短波长方向移动,而寻常光干涉光谱则一般向长波长方向移动;当接近清亮点时,光谱的移动速度加快;在液晶清亮点以上时,偏振相关干涉消失,干涉光谱随温度升高而发生蓝移。进一步推导了液晶的温度系数,理论分析与实验结果一致。该系统具有结构紧凑、集成度高和稳定性好等优点,在液晶的温度效应表征、偏振光学以及光传感等领域中具有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 液晶; 双折射; 马赫-曾德尔干涉仪; 温度系数

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170621

Polarization Spectra of U-Shaped Optical Fiber Cavities Filled with Liquid Crystal and Their Temperature Characteristics

Ma Kuanming, Liu Zixuan, Liu Peiyuan, Li Jie*, Wu Chuang, Guan Baiou

Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications,

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511486, China

Abstract Herein, two sets of interference spectra corresponding to the ordinary and extraordinary waves are obtained by combining the nematic E7 liquid crystal (LC) with a U-shaped optical fiber cavity and applying an external electric field to the LC. In particular, their differing temperature characteristics are investigated. Experimental results show that when the temperature is below the LC's clearing point, the interference spectrum of the extraordinary wave blue-shifts, whereas the spectrum of the ordinary wave generally red-shifts with the increasing temperature. As the temperature approaches the LC's clearing point, these shifts become increasingly faster. However, when the temperature is above the clearing point, the polarization dependence of the structure vanishes; further, the interference spectrum blue-shifts as the temperature increases. Then, the temperature coefficients of the refractive index in case of the LC are theoretically analyzed, which is consistent with the experimental results. The proposed system is compact, highly integrated, and stable, denoting its considerable potential in fields such as LC temperature characterization, polarization optics, and optical sensing.

Key words fiber optics; liquid crystal; birefringence; Mach-Zehnder interferometer; temperature coefficient

OCIS codes 060.2310; 160.3710; 260.1440

1 引言

近年来,将功能材料与光纤器件相结合引起了人们的研究兴趣^[1-3],其中,液晶是一种非常典型的功能材料,它拥有优良的电光效应^[4-5]和温度效应^[6-7],已被广泛应用于光学显示、光电传感以及非

线性光学等诸多领域。与一般晶体材料不同,液晶通常是处于液体与固体之间的中间态,它既拥有液体的流动性,又拥有晶体结构的取向有序性和各向异性等特性^[8-9]。过去,科研人员已将液晶与各种光纤结构相结合,制作了多种光开关、衰减器以及传感器等光子器件。如利用混合液晶光敏材料填充光子

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-03-26; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61575083)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306040)

* E-mail: tjli@jnu.edu.com

晶体光纤,光控调制包层液晶折射率,从而改变输出光强度,制作成快速响应的光开关^[10]。液晶涂覆于侧边抛磨光纤上,通过调制液晶材料折射率引起光模式相位变化,从而制作成全光纤的可控光衰减器^[11]。Luo等^[12]利用弯曲结构的双锥形光纤的模间干涉仪,基于光纤倏逝场与液晶的相互作用,利用温度或电压调制液晶超薄涂层层折射率,实现了全光纤可调光器件。Chen等^[13]基于倾斜光纤光栅对外界折射率的响应特性,利用液晶的电光效应,制作了电压传感器。然而,在实际应用中,由于液晶的折射率通常比较高,在与光纤材料相结合时容易引起模式泄露,造成较大的损耗。另外,对于利用光倏逝场效应的器件,为了提高器件性能,通常需要减小光纤的横向尺寸,但这会影响系统整体结构的稳定性。

基于光纤U型腔的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)引起了研究者的关注^[14],它通过光纤大错位熔接或飞秒激光微加工等方式,使得其中一部分参与干涉的光在空腔中传输,与外界介质发生直接相互作用,具有较高的折射率灵敏度^[15-16]。相较于其他干涉结构,例如级联光纤光栅^[17]、锥形光纤^[18]等,U型腔的光纤结构更加紧凑。此外,由于打破了光纤结构对外界折射率的限制,光纤U型腔更有利于功能光子器件的集成与制作。最近,Xie等^[19]通过毛细管将错位熔接微纳光纤制作的干涉仪与液晶进行封装,实现了对液晶温度系数的检测。然而,该结构仅获得了寻常光的干涉光谱,却无法实现对非寻常光干涉的研究。

本文利用平行电极板将向列相液晶(E7)与光纤U型腔进行封装,利用外加电场得到了对应不同偏振态的干涉光谱,分别研究了寻常光和非寻常光

谱的温度特性,并对其进行了理论分析,该系统在液晶材料的温度效应表征、偏振光学以及光传感等领域具有良好的应用前景。

2 器件原理、制备及光谱特性

图1所示为基于液晶填充光纤U型腔干涉仪的装置原理图,其干涉仪部分由三段单模光纤(Corning, SMF-28)以大偏置量对称错位熔接而成。在实验中,错位熔接距离为光纤半径 $62.5\ \mu\text{m}$,腔长为 L ,两电极板连接交流电压源(AC),其干涉原理为:当入射光传输至导入光纤(lead in fiber)中,到达第一个错位熔接点时,因为界面折射率的突变,入射光被分成两路,一路进入光纤包层,另外一路进入微腔介质。两路光在第二个错位熔接点合并后,通过耦合进入导出光纤(lead out fiber)的纤芯,两路光通过微腔区域时,由于光纤包层与外界介质的折射率不同,两路传输的光之间存在一定的相位差,最终在导出光纤中得到干涉光谱。假设干涉光在光纤包层和微腔中的强度分别为 I_1 和 I_2 ,则干涉光谱强度 I 的表达式为

$$I(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

式中: $\varphi = 2\pi L \Delta n_{\text{eff}} / \lambda = 2\pi L (n_{\text{c-eff}} - n_{\text{clad}}) / \lambda$ 为两路光束的相位差, Δn_{eff} 是腔中介质的折射率 $n_{\text{c-eff}}$ 与包层折射率 n_{clad} 的有效折射率差, λ 为谐振波长。根据(1)式可知,第 m 阶干涉波谷的中心波长 $\lambda_m = 2\Delta n_{\text{eff}} L / (2m + 1)$,其中 m 为整数($m = 0, 1, 2, 3, \dots$)。当腔中介质的折射率改变时, Δn_{eff} 也随之改变,进而引起干涉波长 λ_m 发生漂移。由(1)式可得,光谱中相邻干涉波长间距的自由光谱范围^[20](FSR)为

$$F_{\text{SR}} = \lambda_{m-1} \lambda_m / (\Delta n_{\text{eff}} L). \quad (2)$$

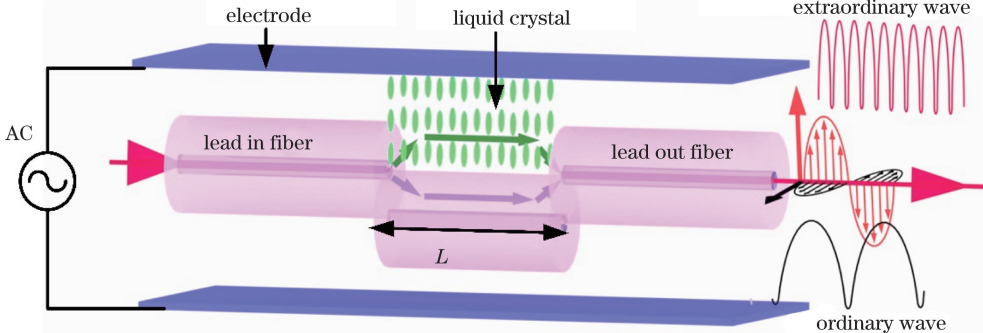


图1 液晶集成光纤U型腔装置原理图

Fig. 1 Schematic of U-shaped optical fiber cavity filled with liquid crystal

本实验中选用向列相液晶,其液晶分子呈棒状,其长轴方向对应单轴晶体的光轴方向。当施加电场时,液晶分子长轴沿着与外加电场平行的方向排列,

整体呈现光学各向异性^[21],光沿着垂直于光轴方向传播发生双折射现象,生成寻常光和非寻常光,对应的折射率为 n_o 和 n_e 。液晶材料具有良好的温度效

应,折射率随温度变化而发生改变,其变化关系满足四参数模型^[22],即

$$n_o(T) \approx A - BT - \frac{(\Delta n)_o}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta, \quad (3)$$

$$n_e(T) \approx A - BT + \frac{2(\Delta n)_e}{3} \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\beta, \quad (4)$$

式中: A 和 B 为常数; T 为温度; $(\Delta n)_o$ 为液晶材料在晶体状态的双折射率; β 为材料系数; T_c 为液晶的清亮点温度。液晶材料的平均折射率随温度的升高而线性减小,函数关系为

$$n = A - BT. \quad (5)$$

图2(a)为液晶填充光纤U型腔的偏振干涉光谱实验系统示意图,其中,宽带光源(BBS, 1250~1650 nm)的输出光经液晶集成光纤U型腔器件后,经偏振控制器(PC)进行偏振旋转,经偏振分束器(PBS)进行偏振分束,最后用光谱分析仪(OSA)进行信号采集与光谱分析。图2(b)为液晶集成光纤U型腔的结构实物照片,器件的制作过程如下所

述:1)采用商用熔接机(FSM-100P+)的手动模式将两段单模光纤进行错位熔接,调节熔接机的马达使得左右光纤在横向方向上产生错位,两个对称的错位熔接点偏置距离皆为 $62.5 \mu\text{m}$,腔长为 $155 \mu\text{m}$,如图2(c)所示。2)选取ITO导电玻璃作为电极板材料,将光纤悬空置于两个电极板中间,采用紫外固化胶将光纤与电极板的相对位置进行固化,光纤轴与电极板的平面相互平行,两个电极板间距为 $250 \mu\text{m}$ 。3)在两个电极板之间缓慢注入液晶,直至充满电极板之间的所有空气间隙,然后在电极板周围用紫外固化胶进行完全固化封装(留下空余位置便于贴上导电铜箔胶带)。这样做一方面可防止液晶材料泄漏,另一方面可使器件保持稳定,避免受到外界干扰。4)在电极板的裸露部分贴上导电铜箔胶带,使其形成良好接触,接通40 V左右的交流电源,对液晶分子实现取向。在器件制作过程中以及制作完成后,利用图2(a)的光路对器件的光谱性能进行检测。

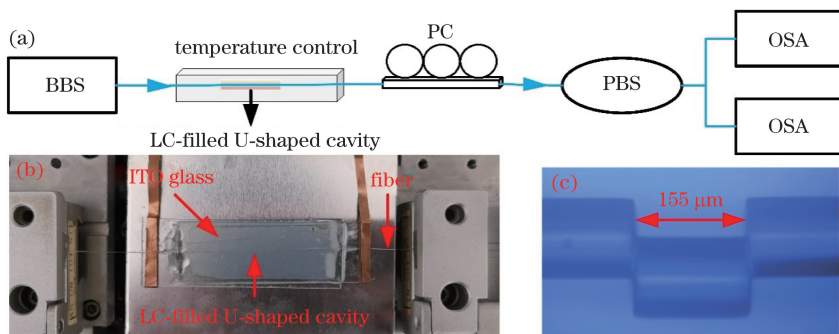


图2 实验系统示意图。(a)实验装置示意图;(b)液晶集成光纤U型腔的结构实物图;(c)光纤U型腔的显微镜实物图

Fig. 2 Schematic of experimental system. (a) Schematic of experimental setup; (b) photograph of liquid-crystal-filled U-shaped fiber device; (c) microscopic photograph of U-shaped fiber cavity

如图1所示,当微腔中传输的光垂直入射在液晶界面时,由于液晶各向异性,寻常光和非寻常光与包层传输的光形成不同的光程差,从而产生不同的干涉光谱。由(1)式可知,由于两个偏振光对应的折射率随温度的变化而变化,导致在腔中液晶与包层内传输的光发生相位差变化,从而使偏振干涉光谱漂移,因此,通过检测干涉波长的漂移可研究器件的温度响应特性。可以预计的是:当温度低于清亮点($T_c = 331.15 \text{ K}$)时,能同时观察到寻常光与非寻常光的偏振干涉光谱;而当温度达到清亮点时,液晶将由各向异性变成各向同性,此时只能观察到寻常光的干涉光谱。图3为室温下填充向列相液晶前与填充液晶后的干涉光谱图。当腔中介质为空气时,发现光谱呈典型的干

涉现象,测得FSR约为 30 nm 。当填充液晶并施加电场后,得到两组不同偏振态的干涉光谱,分别为寻常光与非寻常光干涉光谱。测得不同偏振态干涉光谱的FSR,其中寻常光干涉光谱的FSR可达 285 nm ,而非寻常光干涉光谱的FSR为 56 nm ,这是由于光谱的FSR的决定因素包括干涉光纤长度 L 和有效折射率差 Δn_{eff} 。在干涉长度 L 保持不变的情况下,腔中液晶分子的寻常光折射率比非寻常光折射率更小,所以寻常光对应的干涉光谱具有较大的FSR,而非寻常光干涉光谱的FSR较小。

3 实验结果及分析

为了研究干涉光谱的温度响应特性,将已制作

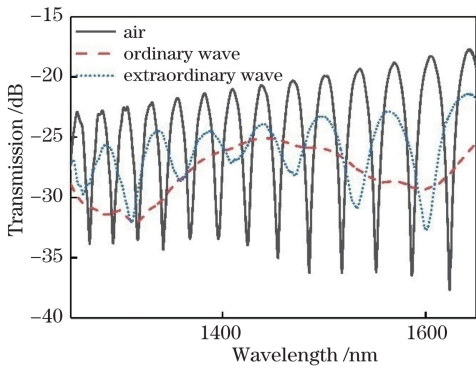


图 3 填充液晶前的干涉光谱以及填充液晶后的寻常光与非寻常光的干涉光谱

Fig. 3 Interference spectra corresponding to structure before filling liquid crystal, ordinary wave after filling liquid crystal, and extraordinary wave after filling liquid crystal, respectively

的器件置于温控盒中,通过控制电路使温控盒的温度从 303.55 K 逐渐升高到 367.95 K,记录各温度点下的光谱数据。当温度低于清亮点时,不同偏振光谱的温度特性具有明显区别。图 4(a)给出寻常光与非寻常光的干涉光谱漂移情况,由图可以看出,寻常光的干涉波长向长波长方向漂移,而非寻常光的干涉波长则向相反方向漂移。为了便于分析,分别

选取干涉光谱的波谷 dip A(寻常光)和 dip B(非寻常光)为例,对这一物理现象进行定性说明。选取这两个 dip 的原因是:如图 4(a)所示,它们随温度变化始终处于 1250~1650 nm 这一可被实验所观察的波段范围之内,从而有助于获得稳定可靠的温度-波长的变化关系;而其他 dip 则随温度变化很快移出了该波段范围之外,不能被继续观测,尽管如此,它们应与 dip A 和 dip B 分别有着非常相似的温度-波长关系,这是由液晶的温度系数决定的(如下所述)。图 4(b)为 dip A 和 dip B 随温度变化的关系,当温度从 303.55 K 上升到 329.45 K 时,寻常光的 dip A 从 1298 nm 逐渐移动到了 1629 nm,变化量大小约为 331 nm;而随着温度从 303.55 K 上升到 326.05 K,非寻常光的 dip B 则从 1601 nm 逐渐移动到了 1291 nm,变化量大小约为 -310 nm。温度越接近液晶清亮点 331.15 K,这种波长移动就越明显。由图 4(b)可见:寻常光干涉波长 dip A 在 329.45 K 时,温度灵敏度为 52.89 nm/K;而非寻常光干涉波长 dip B 在 326.05 K 时,温度灵敏度为 -23.59 nm/K。随着温度变化,寻常光和非寻常光的光谱移动方向有所差异,这是由不同偏振光的液晶温度系数不同决定的。

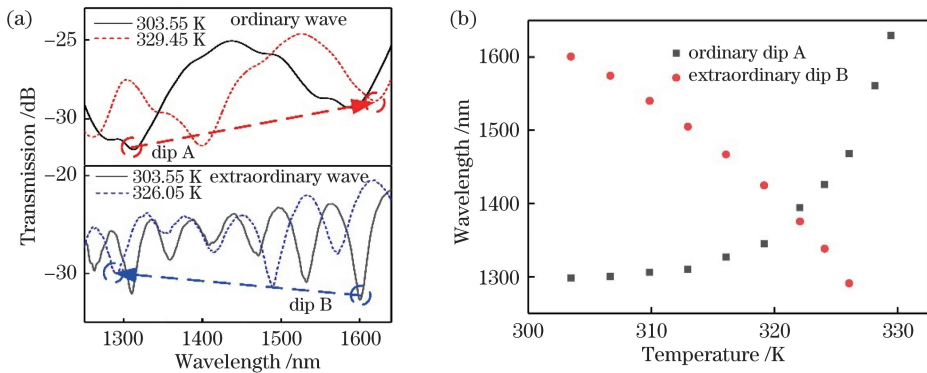


图 4 温度处于清亮点以下时的干涉光谱特性。(a)寻常光和非常光在不同温度下的透射光谱;(b) dip A 和 dip B 随温度的变化关系

Fig. 4 Characteristics of interference spectra when temperatures are below clearing point of liquid crystal. (a) Transmission spectra of ordinary and extraordinary waves at different temperatures; (b) dip wavelength as functions of temperature for dip A and dip B, respectively

当温度达到清亮点以上时,液晶的各向异性特性消失,微腔中传输的光通过液晶时不会发生双折射现象,此时只能观察到一组干涉光谱。图 5(a)给出器件在不同温度下的透射光谱,随着温度的升高,光谱整体发生蓝移。以 dip C 为例,它在一定的温度变化范围内始终位于可被观测的波长区域。图 5(b)为 dip C 随温度变化的关系图,当温度从 331.35 K

升高到 367.95 K 过程中,dip C 从长波长 1630 nm 逐渐移动到短波长 1362 nm,二者呈现良好的线性关系,通过对实验数据进行线性拟合,可获得温度灵敏度为 -7.327 nm/K,线性拟合度达到 99.96%。需要说明的是,仅通过外加电场对液晶分子进行取向,此时低电压场下的微小波动对两组偏振态干涉光谱的温度特性影响不大。

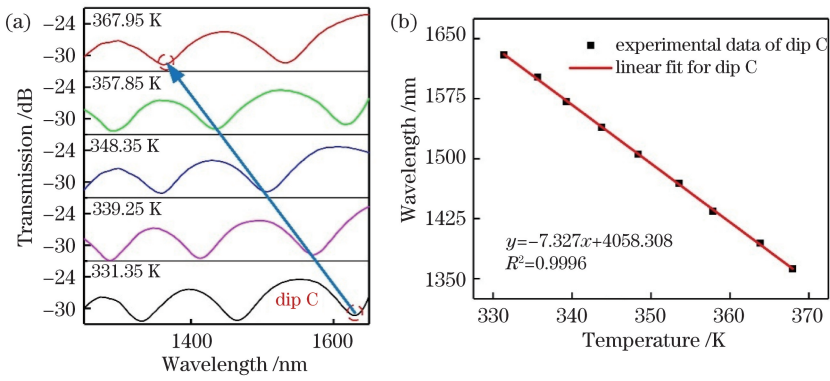


图5 温度处于清亮点以上时的干涉光谱特性。(a)不同温度下的透射光谱;(b) dip C 随温度的变化关系
Fig. 5 Characteristics of interference spectra when temperatures are above clearing point of liquid crystal.

(a) Transmission spectra at different temperatures; (b) dip wavelength as a function of temperature for dip C

如上所述,干涉光谱的漂移是由温度对微腔中液晶折射率的调制引起的。将实验测得的干涉光谱的FSR代入(2)式中,求得各温度点液晶折射率如图6所示。通过数据拟合,即可得到(3)~(5)式中各参数的大小。如图6中实线所示,实验结果与拟合曲线基本重合,拟合度为97.08%。由此,可得到液晶折射率 n_o 与 n_e 分别为

$$\begin{cases} n_o(T) \approx 1.68868 - 4.50272 \times 10^{-4} T - \frac{0.30884}{3} \left(1 - \frac{T}{331.15}\right)^{0.20695} \\ n_e(T) \approx 1.68868 - 4.50272 \times 10^{-4} T + \frac{0.61768}{3} \left(1 - \frac{T}{331.15}\right)^{0.20695} \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式可知,随着温度由303.55 K升高至清亮点, n_o 增大, n_e 变小。由(1)式知,这是导致寻常光谱发生红移而非寻常光谱发生蓝移现象的原因。当温度达到清亮点以上时,液晶变为各向同性,且折射率随温度升高而减小,干涉光谱发生蓝移,与实验结果相一致。

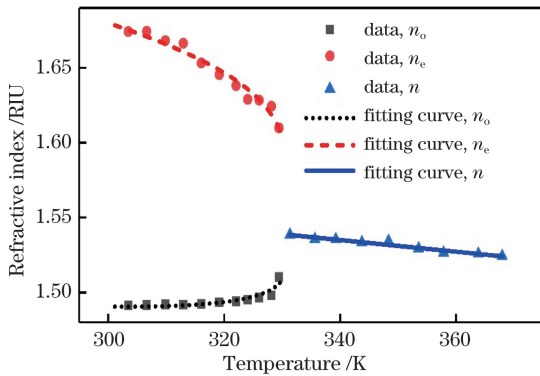


图6 液晶折射率随温度的变化关系
Fig. 6 Refractive index of liquid crystal E7 versus temperature

4 结 论

利用向列相液晶与光纤U型腔干涉仪相结合,通过外加电场对液晶分子取向,得到了两组不同偏振态的干涉光谱。实验结果表明:随着温度逐渐升高至清亮点,寻常光的干涉光谱发生红移,在329.45 K附近的温度灵敏度为52.89 nm/K;而非寻常光的光谱发生蓝移,在326.05 K附近的温度灵敏度为-23.59 nm/K。当温度高于清亮点时,干涉光谱随温度升高整体发生蓝移,呈现良好的线性关系,测得的温度灵敏度为-7.327 nm/K。进一步通过数据拟合,得到了液晶对应寻常光和非寻常光折射率的温度系数,与实验结果相互匹配。本研究所提出的器件具有结构紧凑、集成度高和稳定性高等优点,在液晶材料的温度效应表征、偏振光学以及光传感等领域展现出良好的潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] Li C, Lu X Q, Yu C B, *et al.* Fiber-optic acoustic sensor based on multi-layered graphene material[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328017.
李晨, 陆雪琪, 庾财斌, 等. 基于多层石墨烯材料的光纤声波传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328017.
- [2] Yoon M S, Kim Y J, Kim S K, *et al.* Enhancement of temperature sensitivity of a Mach-Zehnder interferometer based on a polymer-overlaid microfiber [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 96345J.
- [3] Li J, Fan P C, Tian Z, *et al.* Potential for simultaneous measurement of magnetic field and temperature utilizing fiber taper modal interferometer and magnetic fluid[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(6): 6805609.

- [4] Chen Q, Lin M R, Lee J E, *et al.* Nanocomposites with very large electro-optic effect and widely tunable refractive index[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(14): 141121.
- [5] Song L, Lee W K, Wang X S. AC electric field assisted photo-induced high efficiency orientational diffractive grating in nematic liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2006, 14(6): 2197-2202.
- [6] Lei X Q, Yu Y T, Feng W J, *et al.* A novel fiber temperature sensor with liquid-crystal filled SM-NC-SM structure[J]. *Journal of Optoelectronics•Laser*, 2015, 26(12): 2278-2282.
雷雪琴, 于雅婷, 俸闻婧, 等. 一种新型的液晶填充 SM-NC-SM 结构光纤温度传感器[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(12): 2278-2282.
- [7] Wang D D, Li B H, Qi B, *et al.* Design for liquid crystal photonic crystal fiber and thermal tuning characteristic analysis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030602.
王豆豆, 李百宏, 齐兵, 等. 液晶光子晶体光纤的设计及热调谐特性分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030602.
- [8] Blinov L M. *Structure and properties of liquid crystals*[M]. Dordrecht: Springer, 2011: 285-340.
- [9] Yang D K, Wu S T. *Fundamentals of liquid crystal devices*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014: 1-40.
- [10] Hsiao V K S, Ko C Y. Light-controllable photoresponsive liquid-crystal photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12670-12676.
- [11] Hsiao V K S, Li Z, Chen Z, *et al.* Optically controllable side-polished fiber attenuator with photoresponsive liquid crystal overlay[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19988-19995.
- [12] Luo H M, Wang C J, Ji Y H, *et al.* Spectral tuning of a locally bent microfiber taper interferometer with a nanosized liquid crystal overlay[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7393-7398.
- [13] Chen X Y, Du F, Guo T, *et al.* Liquid crystal-embedded tilted fiber grating electric field intensity sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3347-3353.
- [14] Duan D W, Rao Y J, Xu L C, *et al.* In-fiber Mach-Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 160(1): 1198-1202.
- [15] Sun X Y, Chu D K, Dong X R, *et al.* Highly sensitive refractive index fiber inline Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining and chemical etching [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 77: 11-15.
- [16] Su D S, Ma K M, Sun L P, *et al.* Refractive index sensing characteristics of reflective fiber interferometer based on large offset splicing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080603.
苏达顺, 马宽明, 孙立朋, 等. 基于大偏置量熔接的反射式光纤型干涉仪的折射率传感特性 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080603.
- [17] Han Y G, Lee B H, Han W T, *et al.* Fibre-optic sensing applications of a pair of long-period fibre gratings [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(7): 778-781.
- [18] Bhardwaj V, Singh V K. Fabrication and characterization of cascaded tapered Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 244: 30-34.
- [19] Xie N J, Zhang H, Liu B, *et al.* Characterization of temperature-dependent refractive indices for nematic liquid crystal employing a microfiber-assisted Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(14): 2966-2972.
- [20] Chen C H, Wu W T, Wang J N. All-fiber microfluidic multimode Mach-Zehnder interferometers as high sensitivity refractive index sensors [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(2): 429-440.
- [21] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering optics* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2007: 538-544.
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 538-544.
- [22] Li J, Gauza S, Wu S T. Temperature effect on liquid crystal refractive indices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(1): 19-24.