

用于向列相液晶取向测量的侧边抛磨 光纤传感特性研究

韩玉琪¹ 陈 哲^{1,2} 余健辉^{1,2*} 李浩智¹ 何小莉¹ 张 军^{1,2}
罗云瀚^{1,2} 卢惠辉^{1,2} 唐洁媛^{1,2} 黄汉凯¹

(¹暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632
²暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要 向列相液晶(NLC)的取向变化对外界环境敏感,已被作为生物传感的敏感中介材料。研究了侧边抛磨光纤(SPF)用于NLC取向变化测量的传感特性,探索利用SPF测量液晶取向变化的可行性与适用范围。将液晶折射率的理论公式与SPF传输光功率实验数据结合,得到了经验理论关系。实验中设计用机械旋转法改变SPF抛磨面附近NLC的取向。实验结果表明,NLC的取向变化导致SPF传输光功率的变化。以液晶指向矢方位角为表征的NLC的取向变化从0°增大至90°,SPF传输光功率随之增大28.10 dB;在0°~30°范围内,SPF传输光功率与NLC的取向变化具有线性关系,光纤传输光功率对取向角度变化的响应平均约为0.359 dB/(°)。研究表明SPF可以用于NLC的取向变化的测量并且获得了适用范围,这为基于液晶取向变化的SPF生物传感器的研究提供了参考。

关键词 光纤光学;侧边抛磨光纤;光纤传感;向列相液晶;取向变化;光传输功率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0206006

Side-Polished Fiber Sensing for Measurement of Nematic Liquid Crystal Orientation

Han Yuqi¹ Chen Zhe^{1,2} Yu Jianhui^{1,2} Li Haozhi¹ He Xiaoli¹
Zhang Jun^{1,2} Luo Yunhan^{1,2} Lu Huihui^{1,2} Tang Jieyuan^{1,2} Huang Hankai¹

¹Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China
²Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract The orientation change of nematic liquid crystal (NLC) can be used in biosensor. The sensing characteristics of side-polished fiber (SPF) for measurement of NLC orientation are investigated. The relationship between the theoretical formula of liquid crystal refractive index and the optical transmission power in SPF is derived by empirical approach. The mechanical rotating method is designed to change the orientation of NLC on the polished surface. Experimental results show that the orientation variation of liquid crystal can indeed be used to monitor the output optical power transmitted through the SPF. With mechanical rotation method, when the rotation angle increases from 0° to 90°, the output optical power increases by 28.10 dB. With in the angle range from 0° to 30°, the response is almost linear. The average response slope is about 0.359 dB/(°), which indicates relatively high

收稿日期: 2013-07-20; **收到修改稿日期**: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61177075, 11004086, 61008057, 61275046)、广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目资助(2012A032300016)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(21612437, 21613405, 21613325)、广东高校优秀青年创新人才培养计划(YM10024)、暨南大学优秀本科推免生科研创新培育计划、暨南大学本科生创新科技工程项目

作者简介: 韩玉琪(1983—),女,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: hanyuqi8373@163.com

导师简介: 陈 哲(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光纤无源器件、光纤通信与光纤传感技术、光电检测技术、光学设计、光学及光电系统计算机仿真等方面的研究。E-mail: thzhechen@jnu.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: kensomyu@gmail.com

sensitivity. Experiments indicate that SPF can be used to measure the orientation variation of NLC, and the variation range is also obtained. The work provides a reference for a new fiber optical biosensor based on the SPF and NLC.

Key words fiber optics; side-polished fiber; optical fiber sensing; nematic liquid crystal; orientational variation; optical transmission power

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 160.3710

1 引 言

液晶(LC)具有取向有序性,易于形变,电磁场、切变力、表面吸附等都能使液晶产生可观的形变,液晶的形变导致液晶取向排列的改变。液晶分子的取向改变对外界环境敏感,因而被作为“敏感元件”引入传感器领域。基于液晶的生物传感研究,特别是基于液晶取向改变的光学特性放大效应的研究,近年来已成为生物传感领域的研究热点。1998年,美国威斯康星大学麦迪逊分校的Abbott研究小组基于液晶取向改变的特点,将配体与受体的结合作用在偏光显微镜下实现了光学特性放大,从而开辟了液晶应用于生物传感的新领域^[1-2]。目前报道的测量液晶取向变化的研究方法,主要集中于在偏光显微镜下通过检测液晶盒的透射率、织构变化等实现对液晶取向变化的定性分析、对目标生物分子的定量检测^[3-4]。

光纤传感器特别是基于倏逝波的光纤传感器已经广泛应用于生物医学领域的传感研究^[5-7]。侧边抛磨光纤(SPF)是利用光学微加工技术,在标准光纤上去掉部分包层后制成的特殊光纤^[8-10]。由于光纤被抛磨掉的包层部分已不能束缚纤芯中的传输光,纤芯中的光场以倏逝场形式通过抛磨区泄漏出来,使外界环境可与光纤中传输的光场相互作用,因此SPF抛磨区的传输光场具有对外界环境敏感的特性^[11-14]。SPF和液晶相联合,也已经应用于一些物理量的传感,它们主要是应用了光纤传感器的小型化、无污染、与检测物无化学相互作用等特点。通过在SPF抛磨区涂覆液晶材料,已经制成了基于液晶的SPF偏振器^[15]、调制器^[16]、滤波器^[17]等新型光学器件。Hsiao等^[18-19]将偶氮苯聚合物作为客体添加到向列相液晶(NLC)中涂覆在SPF侧边抛磨区,制成了基于液晶的SPF可控光衰减器;Yu等^[20-21]在SPF的抛磨区涂覆混合液晶,成功制作了光纤光功率传感器。为了在SPF上实现对液晶取向改变的光学特性放大效应,本文研究了SPF传输光功率的响应特性测量NLC取向变化的可行性,获得了SPF测量液晶取向变化的适用范围,为基于液晶取向变化的SPF生物传感器的研究提供了参考。

2 实验设计与分析

液晶分子的空间取向决定着液晶的特性。NLC分子可以看作是刚性长棒状,液晶分子的取向用沿其长轴方向的液晶指向矢描述^[22-23]。在直角坐标系下可用指向矢的方位角 φ ,以及指向矢的倾角 θ 来确定指向矢的空间取向,如图1所示。液晶指向矢可以通过外界条件控制,在实际应用中可以通过液晶盒基板表面取向的锚泊作用使液晶分子发生取向^[22]。设计了利用机械旋转液晶盒基板锚泊方向的实验方法来改变液晶的取向,确定SPF传感特性与液晶取向变化的相关性。实验中所用SPF和液晶盒的排布如图2所示,ITO为铟锡氧化物。

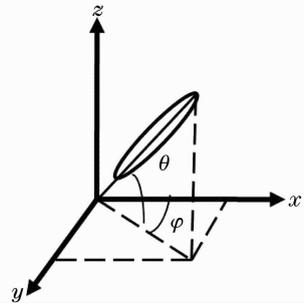


图1 直角坐标系中NLC指向矢示意图

Fig. 1 Orientation diagram of nematic liquid crystal director in Cartesian coordinate system

液晶盒基板经过表面取向处理后,液晶分子在表面锚泊力的作用下,沿基板的锚泊方向彼此平行排列^[24]。在本实验中,采用聚酰亚胺(PI)摩擦方法对液晶盒上下基板进行表面取向处理。由于被直径为 $125\ \mu\text{m}$ 的SPF本身阻隔,液晶盒基板1对抛磨面附近液晶分子的锚泊作用较弱,SPF抛磨面附近液晶分子的取向主要由液晶盒基板2的锚泊作用决定。通过机械旋转基板2,使SPF抛磨面附近液晶分子的取向发生变化。本实验中,设SPF纤芯轴向为 x 方向,设液晶盒基板2的锚泊方向与SPF纤芯轴向方向(x 方向)的夹角为 ϕ 。通过调节偏振控制器使平行于 y 方向的偏振光(TE模)入射进SPF,则在精密旋转台的机械旋转调节下,当夹角 ϕ 为 0° 时,SPF抛磨面附近的NLC指向矢沿SPF纤芯轴向方向彼此平行排列,此时SPF可以感受到的覆盖液晶折射率(RI)为 n_o 。在精密旋转台的调节下,当

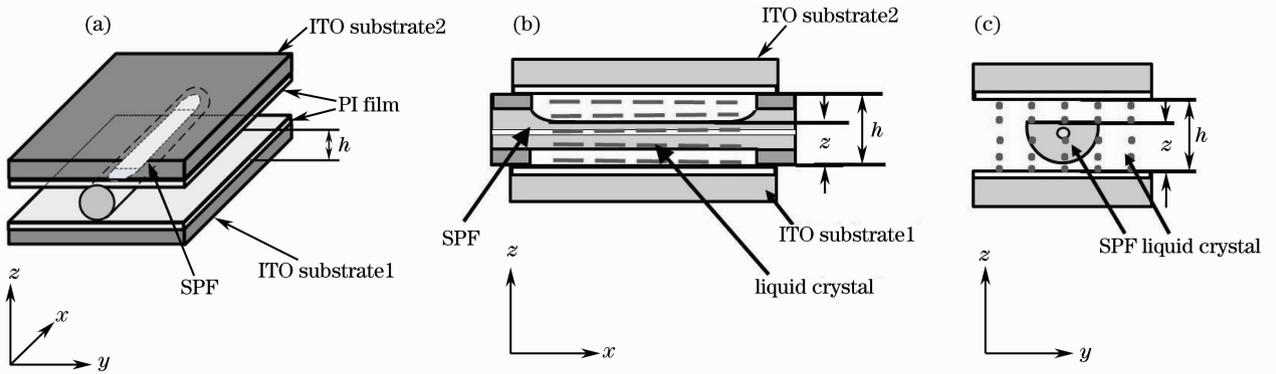


图 2 SPF 和液晶盒的排布。(a)实验制备液晶盒三维示意图；(b)实验制备液晶盒侧面示意图；(c)实验制备液晶盒在 SPF 侧边抛磨区域的横截面示意图

Fig.2 LC cell embedded a SPF. (a) Three-dimensional diagram; (b) profile along the fiber; (c) cross-section view of the polished area of SPF

夹角 ϕ 为 90° 时, SPF 抛磨面附近液晶指向矢与 SPF 纤芯轴向方向呈 90° 排列, SPF 可以感受到的覆盖液晶折射率为 n_e 。当 $0^\circ < \phi < 90^\circ$ 时, SPF 可以感受到的覆盖液晶折射率 n_{LC} 为^[22-23]

$$n_{LC} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \phi + n_e^2 \cos^2 \phi}} \quad (1)$$

经实验测得此覆盖液晶折射率 n_{LC} 与 SPF 中传输光功率的对应关系, 利用(1)式就可以获得抛磨面附近液晶取向的变化与 SPF 中传输光功率经验理论对应关系。

事实上, 利用偏光显微镜可以证明通过机械旋转

液晶盒基板 2 的锚泊方向所引起的液晶取向变化主要体现在液晶分子指向矢的方位角变化。当夹角 ϕ 为 0° 时, 偏光显微镜下呈现暗视场, 如图 3(a) 所示, 此时液晶盒内的液晶分子以平行形式排列, 即 SPF 抛磨面附近液晶指向矢在抛磨面 (xy 平面) 上的投影与 x 方向的方位角为 0° ; 当夹角 ϕ 为 90° 时, 偏光显微镜下呈现亮视场, 如图 3(b) 所示, 此时液晶盒内的液晶分子以扭曲形式排列, 由于 SPF 抛磨面附近液晶分子的取向主要由基板 2 的锚泊作用决定, 可以认为此时抛磨面附近液晶指向矢的方位角为 90° 。

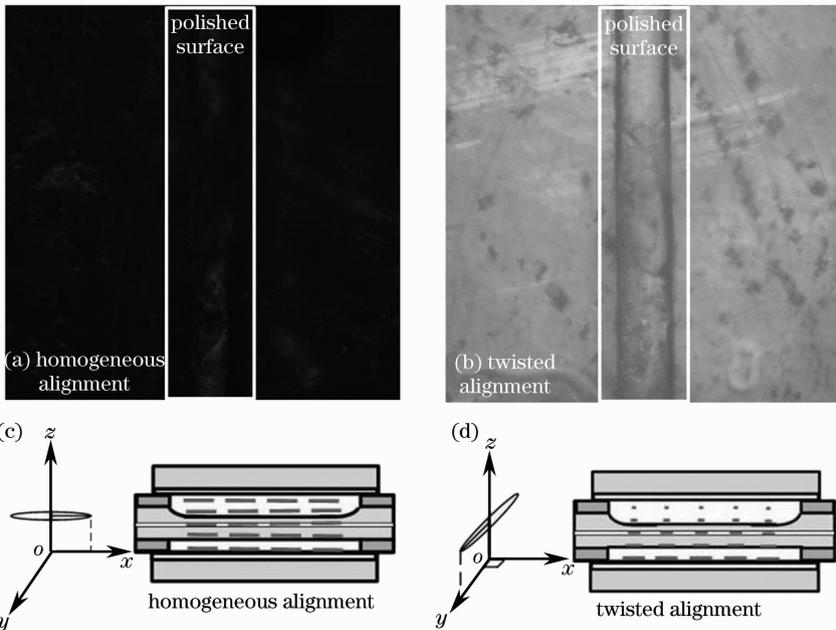


图 3 实验制备液晶盒的偏光显微图片及其对应的抛磨面附近液晶取向示意图。(a)实验制备平行排列液晶盒；(b)实验制备扭曲排列液晶盒

Fig.3 Polarizing microscope images of the LC cell embedded a SPF and schematic diagrams of the LC orientation near the polished surface. (a) Homogeneous alignment LC cell embedded a SPF; (b) twisted alignment LC cell embedded a SPF

3 实验装置

3.1 侧边抛磨光纤的制备及标定

利用轮式光纤侧边抛磨法制备了实验所用的 SPF, 抛磨区域长度为 20 mm, 平均剩余厚度为 2 μm , 即光纤侧边抛磨后抛磨面与纤芯外表面的最近距离平均为 2 μm 。本实验所选用的 NLC 为 5CB, 即 4-正戊基-4'-氰基联苯, 其为热致向列型室温液晶(相变温度: Cr-24-N-35.5-D), 介电各向异性为正, 波长为 1310 nm 条件下, $n_o = 1.5068$, $n_e = 1.6565$ 。

在室温为 26 $^{\circ}\text{C}$, 入射光波长为 1310 nm 的条件下, 选用折射率范围为 1.49~1.6560 的标准折射率液(CARGILLE LABS 公司)作为抛磨区覆盖材料, 通过实验标定 SPF 抛磨区覆盖材料折射率与传输光功率的关系, 结果如图 4 所示。

3.2 液晶盒的制备

研究 SPF 用于 NLC 取向变化测量的传感特性, 需要在 SPF 抛磨区域上构建液晶盒。实验制备了固定有 SPF 的液晶盒, 其三维示意图如图 2(a) 所示, 液晶盒内从上至下形成 ITO 玻璃基板-2-PI 薄膜-液晶-PI 薄膜-ITO 玻璃基板 1 的结构; 将 SPF 保持抛磨面向上, 其纤芯轴向沿基板 1 上 PI 薄膜的锚泊方向固定在基板 1 上, SPF 抛磨面距基板 1 的距离 z 为 131 μm , 如图 2(b) 所示。

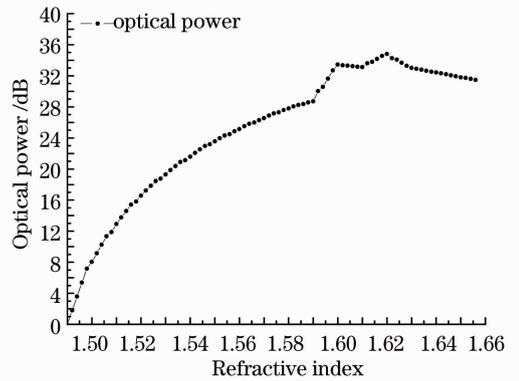


图 4 在室温 26 $^{\circ}\text{C}$ 、入射光波长 1310 nm 的条件下, SPF 覆盖材料折射率与 SPF 传输光功率标定曲线图
Fig. 4 Relationship between RI of the covering material and the optical transmission power in SPF at temperature of 26 $^{\circ}\text{C}$ and a light with wavelength of 1310 nm

3.3 用于向列相液晶取向测量的侧边抛磨光纤传感特性研究的实验装置

由机械旋转法引起的 SPF 抛磨面附近的液晶取向变化与 SPF 中传输光功率的关系, 可以利用如图 5 所示的实验装置通过实验测得。稳定化光源 SOF-1310-D 提供 1310 nm 的探测光, 调节偏振控制器使平行于 y 方向的偏振光 (TE 模) 入射进 SPF, 而后到达光功率计。液晶盒基板 2 与精密旋转台连接, 可以每次间隔 10 $^{\circ}$, 从 0 $^{\circ}$ 单调旋转至 90 $^{\circ}$ 。

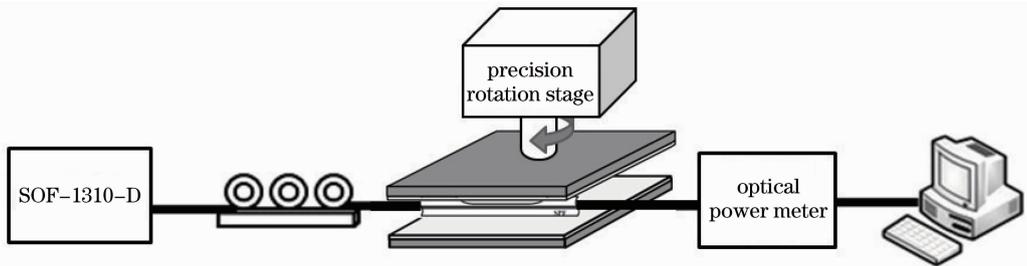


图 5 SPF 测量由机械旋转法引起液晶取向变化的实验装置示意图

Fig. 5 Experimental setup for using SPF to determine the orientation transition of LC caused by the mechanical rotating method

4 实验结果与分析

通过机械旋转法调节液晶盒基板 2 的锚泊方向所引起的液晶取向变化主要体现为液晶分子指向矢方位角的变化。因此, 利用图 4 所示 SPF 折射率-传输光功率实验标定曲线和(1)式, 可以得到随着 NLC 指向矢方位角从 0 $^{\circ}$ 单调增大至 90 $^{\circ}$ 时, SPF 光纤传输光功率的经验理论值, 如图 6(a) 中的实线所示。

在本实验中, 随着基板 2 的锚泊方向与 SPF 纤

芯轴向方向 (x 方向) 的夹角 ϕ 从 0 $^{\circ}$ 单调增大至 90 $^{\circ}$, 测量得到的 SPF 输出光功率增大了 28.10 dB, 如图 6(a) 所示, 图中实验测得的 SPF 输出光功率(圆点)与由(1)式及图 4 得到的经验理论值(实线)在趋势上具有相似性, 即都是 SPF 输出光功率随着 NLC 指向矢方位角的变大而增大。当夹角 ϕ 的变化范围在 0 $^{\circ}$ ~60 $^{\circ}$ 之间, 对实验测得的 SPF 传输光功率 I 拟合, 得到线性方程为 $I = 0.3589\phi - 0.4951$, 其线性相关度 R 为 81.2%, 如图 6(b) 中虚线所示, 表明

SPF 传输光功率与 NLC 的取向变化具有一定线性关系。由图 6(b)中实验测得值拟合可得,夹角 ϕ 每增大 1° , SPF 输出光功率平均增大约 0.359 dB ; 而根据经验理论值(实线), 液晶指向矢方位角每增大

1° 计算得到 SPF 输出光功率增大 0.394 dB , 二者很接近。因此, 当夹角 ϕ 角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内, 利用 SPF 可以实现对 NLC 取向变化的测量。

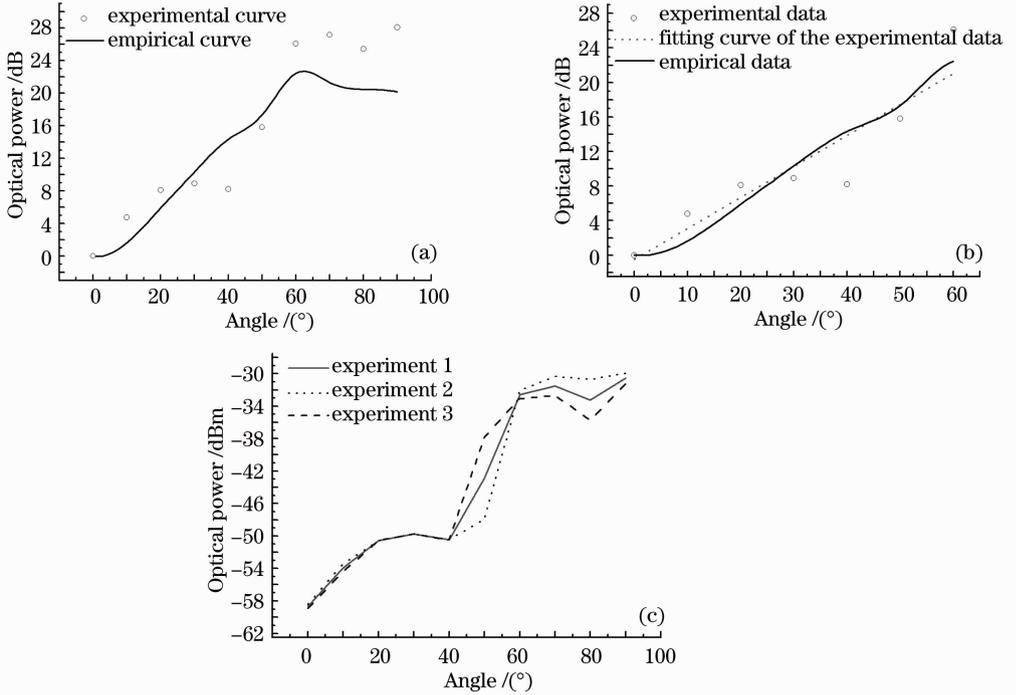


图 6 机械旋转法引起的 NLC 取向变化与 SPF 传输光功率响应特性的关系。(a) $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$;
(b) $0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$; (c) 三次重复测量的实验数据

Fig. 6 Relationship between the orientation variation of the NLC caused by the mechanical rotating method and the optical transmission power I in SPF. (a) $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$; (b) $0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$; (c) experimental data of three repeated measurements

图 6(b)中实验与经验理论值的差别, 主要来自于对于液晶盒的对称性、液晶盒基板对 NLC 的锚泊作用的理想化假设。但事实上, SPF 本身必然会影响到液晶盒内液晶排列的对称性以及液晶盒基板的表面锚泊作用力, 导致液晶盒内的液晶取向有序参数的变化、小范围位置有序的出现, 或者诱发极化取向有序, 以及液晶指向矢倾角的变化, 这些可能的后果都会影响 SPF 抛磨面附近 NLC 的取向变化, 或者使得抛磨面附近 NLC 的局域光轴发生持续的变化, 导致很强的光散射出现^[22-23]。如图 6(c)所示, 在多次重复实验中, 当夹角 ϕ 在 40° 附近, 由于 SPF 的几何边界影响, 抛磨面附近的 NLC 取向出现较大的涨落, 导致很强的光散射, 进而使得在该角度范围内 SPF 传输光功率出现较大的衰减。当夹角 ϕ 大于 40° 之后, 由于液晶指向矢方位角发生大角度的连续旋转以及机械旋转调节本身引入的粘滞效应, 会导致 SPF 抛磨面附近的液晶分布发生附加变化, 使得利用 SPF 测量 NLC 取向变化的重复性欠

佳。值得注意的是, 当夹角 ϕ 的变化范围在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间时, 其线性相关度 R 可达 89.3% 。综合上述分析, 利用 SPF 测量以液晶指向矢方位角为表征的 NLC 取向变化的适用范围可取为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 。

5 结 论

利用 SPF 光纤抛磨区对外界折射率的敏感特性, 研究了 SPF 传输光功率对其抛磨区附近 NLC 取向变化的响应特性, 探索并获得了利用 SPF 测量 NLC 取向变化的可行性与适应范围。设计了机械旋转调节液晶盒基板的锚泊方向的实验方法来改变 SPF 抛磨面附近 NLC 的取向。经实验测得覆盖液晶折射率与 SPF 中传输光功率的对应关系, 利用液晶折射率的关系公式, 获得了抛磨面附近液晶取向的变化与 SPF 中传输光功率理论计算的的经验理论关系。实验结果表明, NLC 的取向变化导致 SPF 传输光功率的变化。利用精密旋转台调节液晶盒基

板的锚泊方向引起 NLC 的取向变化,当夹角 ϕ 从 0° 增大至 90° , SPF 传输光功率随之增大 28.1 dB, 与经验理论值在趋势上具有相似性。当夹角 ϕ 的变化范围在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时, SPF 传输光功率与 NLC 的取向变化具有线性关系。由于 SPF 本身的几何边界约束影响,当夹角 ϕ 在 40° 附近, SPF 传输光功率会由于取向涨落引起的散射导致衰减。因此, SPF 测量以液晶指向矢方位角为表征的 NLC 取向变化的适用范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$, 光纤传输光功率对取向角度变化的响应平均约为 $0.359 \text{ dB}/(^\circ)$ 。理论分析和实验都表明,可以利用 SPF 表征 NLC 的取向变化,并且通过实验研究,获得了利用 SPF 测量液晶取向变化的适用范围。这在 SPF 上实现对液晶取向改变的特殊光学特性放大效应,进一步研究基于液晶光学特性放大的 SPF 生物传感器提供了参考。

参 考 文 献

- V K Gupta, J J Skaife, T B Dubrovsky, *et al.*. Optical amplification of ligand-receptor binding using liquid crystals [J]. *Science*, 1998, 279(5359): 2077–2080.
- J M Brake, M K Daschner, Y Y Luk, *et al.*. Biomolecular interactions at phospholipid-decorated surfaces of liquid crystals [J]. *Science*, 2003, 302(5653): 2094–2097.
- J M Brake, A D Mezera, N L Abbott. Active control of the anchoring of 4'-pentyl-4-cyanobiphenyl (5CB) at an aqueous-liquid crystal interface by using a redox-active ferrocenyl surfactant [J]. *Langmuir*, 2003, 19(21): 8629–8637.
- M K McCamley, M Ravnik, A W Arstenstein, *et al.*. Detection of alignment changes at the open surface of a confined nematic liquid crystal sensor [J]. *J Appl Phys*, 2009, 105(12): 123504.
- Huang Huijie, Zhai Junhui, Ren Bingqiang, *et al.*. Fiber-optic evanescent wave biosensor and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 451–454.
黄惠杰, 翟俊辉, 任冰强, 等. 光纤倏逝波生物传感器及其应用 [J]. *光学学报*, 2003, 23(4): 451–454.
- Deng Lixin, Feng Ying, Wei Li'an, *et al.*. The research of fiber optic evanescent wave biosensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1688–1692.
邓立新, 冯莹, 魏立安, 等. 基于倏逝波的光纤生物传感器研究 [J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1688–1692.
- H Y Lin, W H Tsai, Y C Tsao, *et al.*. Side-polished multimode fiber biosensor based on surface plasmon resonance with halogen light [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(5): 800–806.
- Chen Zhe, Li Fengli, Zhong Jingang, *et al.*. Side polished fiber and application [C]. *Proc of 12th Fiber Communication and 13th Integrated Optics Conference*, 2005. 407–412.
陈哲, 李丰丽, 钟金钢, 等. 侧边抛磨光纤及其应用 [C]. 全国第十二次光纤通信暨第十三届集成光学学术会议论文集, 2005. 407–412.
- Chen Zhe, Cui Fei, Zeng Yingxin. Theoretical analysis on optical propagation characteristics of side-polished fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5): 918–923.
陈哲, 崔菲, 曾应新. 侧边抛磨光纤波导传输特性的理论分析 [J]. *光子学报*, 2008, 37(5): 918–923.
- Chen Zhe, Qin Jiarong, Pan Hao, *et al.*. All-fiber integrated optical power monitor-controller [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(4): 1047–1052.
陈哲, 覃家荣, 潘昊, 等. 全光纤集成化光功率监控器 [J]. *中国激光*, 2010, 37(4): 1047–1052.
- Zhang Yuncong, Chen Zhe, Jiang Peifan, *et al.*. All-fiber thermo-optical variable optical attenuator [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(8): 1110–1114.
张云聪, 陈哲, 江沛凡, 等. 全光纤热光型可变光衰减器 [J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1110–1114.
- Tang Jieyuan, Chen Zhe, Fan Ruoyan, *et al.*. Optical fiber sensor for the concentration of acetic acid based on fiber side polishing technique [J]. *J Applied Optics*, 2011, 32(1): 115–119.
唐洁媛, 陈哲, 范若岩, 等. 基于光纤侧边抛磨技术的醋酸浓度光纤传感器 [J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 115–119.
- Liao Guozhen, Zhang Jun, Cai Xiang, *et al.*. All-fiber temperature sensor based on graphene [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706004.
廖国珍, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706004.
- Tang Jieyuan, Chen Zhe, Fan Ruoyan, *et al.*. Thermo-optic effect of liquid materials based on side polished fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1434–1439.
唐洁媛, 陈哲, 范若岩, 等. 基于侧边抛磨光纤光栅传感器的液体材料热光特性 [J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1434–1439.
- Z K Ioannidis, I P Giles, C Bowry. Liquid crystal all-fiber optical polarizer [J]. *Electron Lett*, 1988, 24(23): 1453–1455.
- Z K Ioannidis, I P Giles, C Bowry. All-fiber optic intensity modulators using liquid crystals [J]. *Appl Opt*, 1991, 30(3): 328–333.
- C H Lee, N K Lee, J W Song. Tunable side-polished optical fiber filter using the thermo-sensitive characteristics of the polymer dispersed liquid crystal [J]. *Microwave & Opt Technol Lett*, 2006, 48(7): 1229–1230.
- V K S Hsiao, Z Li, Z Chen, *et al.*. Optically controllable side-polished fiber attenuator with photoresponsive liquid crystal overlay [J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 19988–19995.
- W H Fu, V K S Hsiao, J Y Tang, *et al.*. All fiber-optic sensing of light using side-polished fiber overlaid with photoresponsive liquid crystals [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 156(1): 423–427.
- J Yu, X Li, Y Du, *et al.*. Study of photorefractive properties of liquid crystal hybrid thin film by side polished fiber sensor [C]. *Asia Pacific Optical Sensors Conference, International Society for Optics and Photonics*, 2012. 835122.
- Jianhui Yu, Haozhi Li, V K Hsiao, *et al.*. A fiber-optic violet sensor by using the surface grating formed by a photosensitive hybrid liquid crystal film on side-polished fiber [J]. *Meas Sci & Technol*, 2013, 24(9): 094019.
- Wang Xinjiu. *Liquid Crystal Optics and Liquid Crystal Display* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 147–225.
王新久. *液晶光学和液晶显示* [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 147–225.
- L M Blinov. *Structure and Properties of Liquid Crystals* [M]. Germany: Springer, 2011. 257–340.
- S W Lee, B Chae, B Lee, *et al.*. Rubbing-induced surface morphology and polymer segmental reorientations of a model brush polyimide and interactions with liquid crystals at the surface [J]. *Chemistry of Materials*, 2003, 15(16): 3105–3112.