

液晶光子晶体光纤电场传感的模式特性

杨 杨¹ 戴海涛^{1,*} 孙小卫¹ 姚建铨²

¹天津大学理学院应用物理系 天津市低维功能材料物理与制备技术重点实验室, 天津 300072

²天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 光子晶体光纤(PCF)的导光特性可通过改变空气孔的结构参数(孔径、间距和排列方式)、材料填充等方法进行调节。由于自身具有电可调性,液晶作为 PCF 的填充材料具有很大的研究价值,可以用于制作电可调 PCF。利用有限元法分析了液晶(E7)填充的光子晶体光纤的基模有效折射率、有效模场面积等参量随占空比、外电场的变化关系,得到了不同占空比下基模的截止电压和一定电压下基模的截止波长。结果表明光子晶体光纤的电压可调范围随占空比增大而增大;占空比一定时,电压越大,波长可调范围越小。这种液晶填充的光子晶体光纤可以应用于电场传感等领域。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;有限元法;液晶

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s105013

Mode Characteristics of Liquid Crystal Filled Photonic Crystal Fiber in Electric Field Sensing

Yang Yang¹ Dai Haitao¹ Sun Xiaowei¹ Yao Jianquan²

¹Tianjin Key Laboratory of Low Dimensional Materials Physics and Preparing Technology, Department of Applied Physics, School of Science University, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Ministry of Education, Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Optical guiding characteristics of photonic crystal fibers (PCF) can be tuned by varying the parameters of air holes (diameter, distance and arrangement) and filling dielectric materials. Liquid crystal is one promising material used as the filling agent in PCF due to its electrical tunability, which can lead to the electrically tunable PCFs. Finite element method (FEM) is used to explore the effective refractive indices and effective areas of fundamental modes of PCF filled with liquid crystal (E7) as functions of duty cycles and voltages. Both the cut off voltages under variable duty cycles and cut off wavelengths under constant voltages are obtained for fundamental modes. Numerical results also show that cut off voltages increase as the duty cycles increasing, meanwhile the tunable wavelength range decreases as voltages increasing under constant duty cycles. PCFs filled with liquid crystal are expected in the application of electric field sensing.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; finite element method; liquid crystals

OCIS codes 060.5295; 060.2310; 060.2370; 160.3710

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)又称微结构光纤。英国南

安普顿大学于 1996 年率先制得具有光子晶体包层的全内反射型光子晶体光纤^[1](TIR-PCF)。1998

收稿日期: 2011-10-08; **收到修改稿日期**: 2011-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61177061)和天津大学自主创新基金资助课题。

作者简介: 杨 杨(1985—),男,博士研究生,主要从事光子晶体光纤和纳米光学天线等方面的研究。

E-mail: yang2010@tju.edu.cn

导师简介: 孙小卫(1968—),男,博士,教授,主要从事光电子材料、器件与技术等方面的研究。

E-mail: xwsun@tju.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: htdai@tju.edu.cn

年, Bath 大学也制备出了具有光子带隙效应的光子晶体光纤(PBG-PCF)。这两种光纤的本质区别在于它们的导光机制不同。全内反射型 PCF 的纤芯折射率大于包层有效折射率, 这种光纤的导光机制类似于传统阶跃光纤; 对于光子带隙型 PCF, 不论纤芯是空心还是实心, 纤芯的有效折射率都小于包层有效折射率, 其导光机制为光子带隙效应。

光子晶体光纤通常由单一介质和空气孔组成, 一旦制作材料和结构参数确定, 其光传输特性就被确定。为了调节 PCF 的光传输特性, 研究者们先后用聚合物^[2]、液晶^[3~5]、液体^[6]、金属纳米颗粒^[7]等材料对 PCF 空气孔进行填充, 制作了光开关、滤波器和光纤传感器等器件。在各种填充物中, 液晶由于介电常数的各向异性和折射率的电可调特性而被广泛用于制作光栅^[8]、光衰减器^[9]、空间光调制器^[10]等光电器件。本文将采用向列型液晶 E7 作为填充物, 利用外电场变化时液晶折射率的变化, 引起 PCF 中光传输特性的改变, 研究液晶填充的实芯 TIR-PCF 的电场传感特性。

2 液晶折射率的电场特性

液晶分子有很强的光学各向异性, 且液晶分子的排列方向会受外加电场的影响, 这使得填充液晶的光子晶体光纤具有良好的电可调特性。向列型液晶具有与单轴晶体一样的光学各向异性, 计算它的折射率时可以将它看作单轴晶体^[11], 并将折射率表示为与之类似的折射率椭球。根据单轴晶体各向异性的张量表示, 在光传播方向与液晶分子长轴方向平行时, 液晶分子各向异性为

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_o & & \\ & n_o & \\ & & n_e \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 n_o 为液晶寻常光折射率, n_e 为其非常光折射率。当光线传播方向与液晶分子长轴有一个夹角 θ 时, 液晶的折射率张量表示为

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n' & & \\ & n' & \\ & & n'' \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 n' 与 n'' 可表示为

$$n' = n_o, \quad \frac{1}{n''^2} = \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2}. \quad (3)$$

液晶分子填充进 PCF 空气孔, 其排列方向主要取决于空气孔直径、边界条件和外界电磁场^[12]。如图 1(a) 建立直角坐标系, x 轴与 y 轴在光纤横截面

内, y 轴方向与外电场方向平行, z 轴与光纤轴向(即空气孔轴向)平行。外电场不存在时, 液晶分子排列方向由 PCF 空气孔内侧与液晶分子的相互作用所决定, 一般沿光纤轴向(即 z 方向)排列, 如图 1(b) 所示。当施加一个沿着 y 方向的可调电场 E 时, 液晶分子将偏离 z 轴, 在 yz 平面内旋转, 见图 1(c)。液晶分子长轴与 z 轴之间的夹角称为液晶偏转角 θ 。

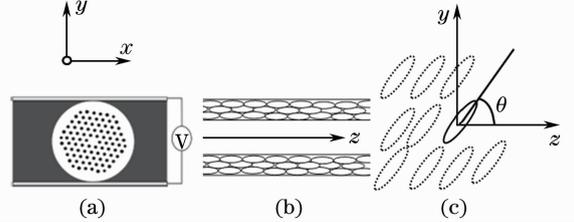


图 1 (a) PCF 横截面结构及外加电压装置示意图; (b) 无外电场时 PCF 空气孔中液晶分子的排列; (c) 外电场作用下液晶分子在 yz 面内的偏转, 偏转角为 θ

Fig. 1 (a) Schematic of cross-section of PCF and device for applying voltage; (b) alignment of liquid crystal in air holes of PCF without applying voltage; (c) orientation of liquid crystal in yz plane when applying voltage. Orientation angle is θ

外电场 E 与偏转角 θ 之间的关系为^[11]

$$\theta = \begin{cases} 0, & E_{\text{eff}} \leq E_c \\ \frac{\pi}{2} - 2\arctan \left[\exp \left(-\frac{E_{\text{eff}} - E_c}{30E_c} \right) \right], & E_{\text{eff}} > E_c \end{cases}. \quad (4)$$

此时, 液晶分子在 x 方向的折射率为寻常光折射率, 在 y 方向的折射率 $n_y = n''$ ($n_o < n'' < n_e$)。 E_{eff} 为作用在液晶分子上并控制其排列方向的那部分有效电压, E_c 为阈值电压, 只与液晶分子本身的性质有关, 表示为

$$E_c = (\pi/2R) \sqrt{k_{11}/\Delta\epsilon}, \quad (5)$$

式中 k_{11} 是弹性常数, $\Delta\epsilon$ 是各向介电异性系数^[13]。取 R 为空气孔间距 Λ 的一半, 各常数取值如下: $k_{11} = 34 \text{ pF}$, $\Delta\epsilon = 10$, $R = 1 \text{ } \mu\text{m}$, $\Lambda = 2 \text{ } \mu\text{m}$ 。代入(5)式得 $E_c = 2.895 \text{ V}$ 。在室温 $15 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下, 入射波长 $\lambda = 1.55 \text{ } \mu\text{m}$ 时的液晶分子折射率 $n_o = 1.5$, $n_e = 1.71$ ^[14]。

当 $E_{\text{eff}} < E_c$ 时, 即有效电压小于阈值电压, 不足以使液晶分子发生偏转, 入射光在空气孔内不发生双折射; 当 E_{eff} 超过阈值电压时, 空气孔内将发生双折射。取外电场 E 为 E_c 的整数倍, 即 $0, E_c, 2E_c, 3E_c, \dots, 50E_c$, 可绘出偏转角 θ 、 y 方向折射率 n_y 与

电压之间的关系,如图 2 所示。当电压变化时,引起液晶分子偏转角 θ 的变化,进而引起液晶 y 方向有效折射率的变化。这种现象为通过电压调制液晶 PCF 的模式特性提供了可能。

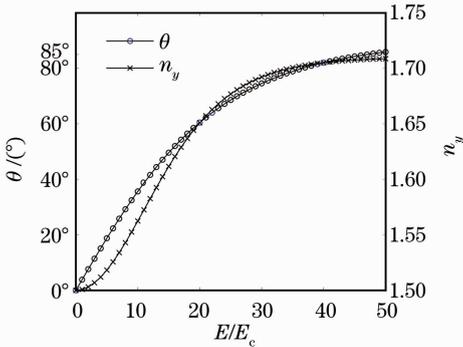


图 2 液晶分子偏转角 θ 与 y 方向折射率 n_y 随外电场的变化

Fig. 2 Variation of orientation angle of liquid crystal θ and refractive index along y direction n_y with applied electric field

3 全内反射型 PCF 基模的电场特性

采用有限元法,设定入射波长为 $1.55 \mu\text{m}$,背景材料折射率 $n_o = 1.6$,采用三角形空气孔排布的光纤截面[如图 1(a)所示]。空气孔直径与间距之比 d/Λ 定义为占空比。不同占空比下 PCF 基模有效折射率随电压的变化关系如图 3 所示。不同占空比下,基模有效折射率随着电压增大而增大;占空比越大,有效折射率可调范围越大。在图 3 中,占空比为 0.6 的结构在电压超过 $12E_c$ 时的基模已经消失;当电压超过 $14E_c$ 时,所有占空比下的基模都无法传输。

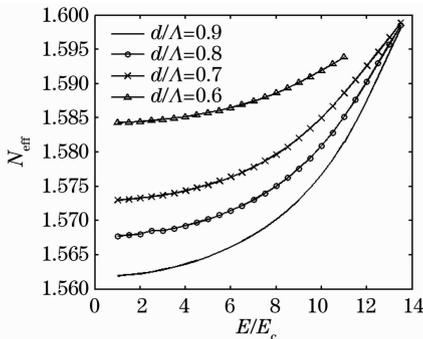


图 3 不同占空比下 PCF 基模有效折射率随电压的变化关系(入射波长 $1.55 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Relationships between effective indices of fundamental modes in PFC and voltage under variable duty cycles (incident wavelength at $1.55 \mu\text{m}$)

由图 2 看出, n_y 随着 E 的增加而增大。这会导致光纤纤芯和包层的有效折射率差变小,纤芯对光

场的束缚能力减小。因此,基模在光纤中的有效模场面积会随着电压增大。本文中定义使得某一模式有效模面积 A_{eff} 发生突变(突然增大)的电压为该模式的截止电压。如图 4 所示,随着占空比的增大,其截止电压也是增大的。在图 4 中曲线开始突增处取切线(如虚线所示),虚线与横轴的交点即为基模的截止电压。由图 4 可以看出,增大占空比可以增大截止电压,从而增大电压测量范围。

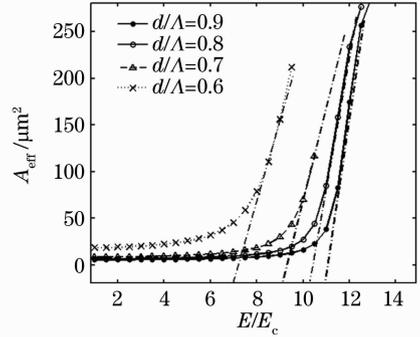


图 4 不同占空比下有效模面积随电压变化的模拟结果

Fig. 4 Numerical results of effective areas varied with voltage of different duty cycles

为考察填充液晶 PCF 在特定电压下的基模截止波长,需要给出向列型液晶的色散关系。从(3)式可知 x 方向折射率 n' 和 y 方向折射率 $n_y = n''$ 不但与偏转角 θ 有关,而且与 n_o 和 n_e 有关。当入射波长发生变化时, n_o 和 n_e 也随之改变。 15°C 下 n_o 和 n_e 的色散关系可表示为^[14]

$$\begin{aligned} n_o &= 1.5006 + \frac{0.0065}{\lambda^2} + \frac{0.0004}{\lambda^4}, \\ n_e &= 1.7055 + \frac{0.0087}{\lambda^2} + \frac{0.0028}{\lambda^4}. \end{aligned} \quad (6)$$

仍以 $E_c = 2.895 \text{ V}$ 作为单位,取 $E = E_c, 5E_c, 10E_c$,得到 n_y 与波长的关系如图 5(a)所示。为获得更灵敏的电压调制,选取占空比为 0.9 的光纤截面结构。图 5(b)为占空比 0.9 下基模有效折射率的色散曲线。

在无填充的 PCF 中,基模是无限单模传输的,二阶模会随着波长增大而截止。而在液晶填充的 PCF 中,由于液晶的正常色散,加上电压调制,会使 n_y 随波长减小而迅速上升[如图 5(a)所示],从而破坏基模的传输。

图 6 给出了不同电压下有效模面积随波长的变化关系。采用与图 4 相同的方法,在有效模面积突变处作切线,如虚线所示。在 $0.7 \mu\text{m} \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的波段上, A_{eff} 随波长的增大而增大,这与无填充的 PCF 无异;不同的是,在小于 $0.7 \mu\text{m}$ 的波段上,随

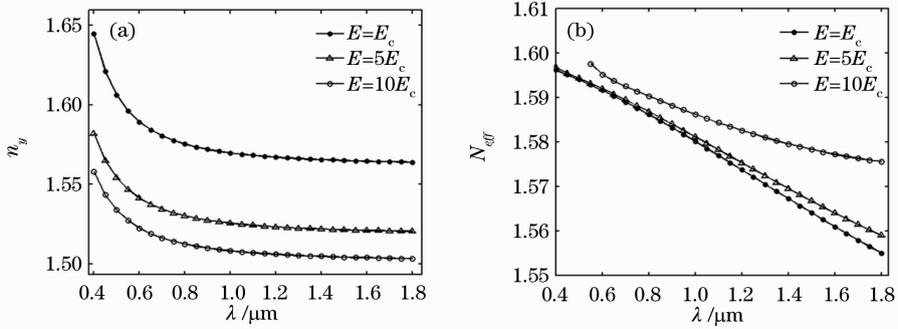


图 5 不同电压下 y 方向折射率(a)与基模有效折射率(b)的色散关系

Fig. 5 Dispersion curves of refractive indices in y direction (a) and effective refractive indices of fundamental modes (b) with variable voltages

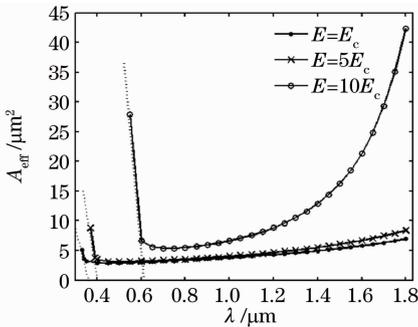


图 6 不同电压下基模有效模面积随波长的变化关系

Fig. 6 Effective refractive areas of fundamental modes as a function of incident wavelength with various applied voltages

着波长的减小,无填充 PCF 的 A_{eff} 会随之减小,而液晶填充的 PCF 在 $E=10E_c$ 下的 A_{eff} 曲线在 $0.61 \mu\text{m}$ 处率先发生突变。 $E=5E_c$ 、 $E=E_c$ 的截止波长分别在 $0.4 \mu\text{m}$ 和 $0.2 \mu\text{m}$ 左右。可见随着电压的增大,基模的截止波长是不断增大的。

4 结 论

在全内反射型光子晶体光纤的包层空气孔中,填充向列型液晶。根据液晶折射率的各向异性及其随电压变化的关系式,分析了液晶填充的光子晶体光纤的基模有效折射率、有效模场面积随着电压、占空比的变化关系,得到了不同的占空比下的截止电压。计算结果表明,占空比越大的光纤结构,截止电压越大,即有更大的电压可调范围。在恒压下,获得了基模的截止波长,为电控光子晶体光纤入射光波段范围的选取提供了依据,对于光子晶体光纤用作电场传感器有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549

2 B. Eggleton, C. Kerbage, P. Westbrook *et al.*. Microstructured optical fiber devices[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~713

3 T. Larsen, A. Bjarklev, D. Hermann *et al.*. Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(20): 2589~2596

4 F. Du, Y. Q. Lu, S. T. Wu *et al.*. Electrically tunable liquid-crystal photonic crystal fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2181~2183

5 Qian Xiangzhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 988~991

钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 988~991

6 Y. Zhang, C. Shi, C. Gu *et al.*. Liquid core photonic crystal fiber sensor based on surface enhanced Raman scattering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(19): 193504

7 M. V. Alfimov, A. M. Zheltikov. The figure of merit of a photonic-crystal fiber beam delivery and response-signal collection for nanoparticle-assisted sensor arrays[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(5): 363~367

8 Dong Yufang, Li Haiyan, Xu Zeda. Phase gratings formed in photoinduced azo-polymer in liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1021~1025

董毓芳, 李海燕, 徐则达. 光诱导液晶中偶氮聚合物形成相光栅的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1021~1025

9 Zheng Jihong, Gu Linguan, Zhang Xingde *et al.*. The study of electrooptical characteristics of polymer dispersed liquid crystal at 1550 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1095~1098

郑继红, 顾玲娟, 张兴德等. 聚合物弥散液晶材料在 1550 nm 的电光特性研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1095~1098

10 Cai Dongmei, Yao Jun, Jiang Wenhan *et al.*. Performance of liquid-crystal spatial light modulator using for wave-front correction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 285~291

蔡冬梅, 姚 军, 姜文汉等. 液晶空间光调制器用于波前校正的性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 285~291

11 Zhao Jieli, Ren Guangjun. Empirical study of electro-optic birefringent effect of liquid crystal[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2006, **21**(4): 384~387

赵阶林, 任广军. 液晶电控效应的实验研究[J]. *液晶与显示*, 2006, **21**(4): 384~387

12 Qian Xiangzhong. Temperature sensor properties in total internal reflection-photonic crystal fibers based on liquid crystal filling [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2009, **26**(3): 380~384

钱祥忠. 基于液晶填充的全内反射型光子晶体光纤的温度传感特性[J]. *量子电子学报*, 2009, **26**(3): 380~384

13 Huang Fangyun, Yang Dong. Optical waveguide properties of photonic crystal liquid crystal fibers [J]. *Optoelectronic Technology*, 2009, **29**(1): 47~50

黄芳云, 杨 东. 光子晶体液晶光纤的光波导特性[J]. *光电子技术*, 2009, **29**(1): 47~50

14 J. Li, S. T. Wu, S. Brugioni *et al.*. Infrared refractive indices of liquid crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(7): 073501-1