

液晶光波导中本征模内场分量间的关系

查正桃，张谦述

引用本文:

查正桃, 张谦述. 液晶光波导中本征模内场分量间的关系[J]. 液晶与显示, 2022, 37(1): 14–20.

ZHA Zheng-tao, ZHANG Qian-shu. Relationship of field components in the liquid crystal optical waveguide eigenmode[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 14–20.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0276>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基板表面锚泊对液晶全漏导模影响的理论研究

Theoretical study of the surface anchoring effect on the full leaky waveguide mode of liquid crystal

液晶与显示. 2018, 33(6): 483–489 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183306.0483>

增强现实显示衍射光波导的设计

Design of augmented reality display diffraction optical waveguide

液晶与显示. 2021, 36(3): 389–397 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0214>

液晶及其不同填充结构对光子晶体光纤传输特性的影响

Effect of liquid crystal and its different filling structure on the transmission properties of photonic crystal fiber

液晶与显示. 2018, 33(2): 116–122 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183302.0116>

垂直排列硅上液晶显示器件反射率的提升

Improvement of reflectivity of vertical alignment liquid crystal on silicon

液晶与显示. 2021, 36(7): 947–953 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0303>

光取向液晶微结构及其光子元件

Photoalignment enabled liquid crystal microstructures for optics and photonics

液晶与显示. 2021, 36(7): 921–938 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0004>

文章编号:1007-2780(2022)01-0014-07

液晶光波导中本征模内场分量间的关系

查正桃^{1,2}, 张谦述^{2*}

(1. 西华师范大学 物理与天文学院, 四川 南充 637009;

2. 西华师范大学 电子信息工程学院, 四川 南充 637009)

摘要:液晶光波导的本征模场分析是其器件设计的基础与理论支撑,模场分析的准确度直接影响到液晶光波导器件性能的好坏。为了准确分析液晶光波导中本征模场分量间的关系,我们执行了以下步骤。首先,根据麦克斯韦方程组推导出向列相液晶的磁场耦合方程,然后得出非寻常光波本征模式的磁场分量间比值与指向矢旋转角间的定量关系,并利用 OptiBPM13.1 进行数值仿真。仿真结果验证了场分量间比值与指向矢旋转角的正切函数互为相反数这一定量关系。根据这一关系,可通过改变外加电压来控制液晶光波导中本征模场的横向磁场分量间的相对数量级,进而实现非寻常光波所激励的偏振模式的转换。这一规律有助于推动基于液晶光波导的偏振旋转器和模式转换器的研究。

关键词:液晶; 各向异性; 光波导; 本征模场

中图分类号:TN252;O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0276

Relationship of field components in the liquid crystal optical waveguide eigenmode

ZHA Zheng-tao^{1,2}, ZHANG Qian-shu^{2*}(1. School of Physics and Astronomy, China West Normal University,
Nanchong 637009, China;2. School of Electronic Information Engineering, China West Normal University,
Nanchong 637009, China)

Abstract: The eigenmode analysis of liquid crystal optical waveguides (LCOWs) was the basis and theoretical support for the design of its devices. The accuracy of mode field analysis directly affects the performance of LCOW-based devices. We used the following procedure to accurately analyze the relationship of the eigenmode field components in the LCOW. Firstly, the magnetic field coupling equations of the nematic liquid crystals were obtained from Maxwell's equations. Then, the quantitative relationship between the rotation angle of the liquid crystal director and the ratio of the magnetic field

收稿日期:2021-10-30; **修订日期:**2021-11-26.

基金项目:四川省科技厅科研基金(No.2014JY0024);南充市科技局科研基金(No.19YFZJ0090);西华师范大学英才科研基金(No.17YC056)

Supported by the Scientific Research Foundation of the Science and Technology Department of Sichuan Province, China (No. 2014JY0024); Scientific Research Foundation of the Science and Technology Bureau of Nanchong, China (No. 19YFZJ0090); Talent Scientific Research Foundation of China West Normal University Foundation, China (No. 17YC056)

* 通信联系人, E-mail:jackyzhang@cwnu.edu.cn

components of the eigenmodes excited by the extraordinary light wave was obtained. Additionally, the numerical simulation is carried out using OptiBPM13.1. The simulation results verify the quantitative relationship that the ratio between field components and the tangent function of director rotation angle are opposite to each other. According to this relationship, the relative order of magnitude between the transverse magnetic field components of the eigenmode field in the LCOW can be controlled by changing the applied voltage. Then, the conversion of polarization mode excited by an extraordinary light wave can be realized. This law is helpful to promote the research of polarization rotator and mode converter based on LCOW.

Key words: liquid crystal; anisotropy; optical waveguide; eigenmode field

1 引言

向列相液晶的大双折射^[1]和易被低电压调节^[2]特性,有助于改善光波导的光学性能。因此,近年来向列相液晶光波导的研究引起了国内外研究人员的兴趣。例如,向列相液晶光波导在光开关^[3-5]、光衰减器^[6]、光学滤波器^[7]、可调光分束器^[8]、偏振旋转器^[9-10]等器件中的应用研究被广泛开展。

在以上研究中,液晶光波导的模场分析是最基本、最重要的步骤。自 20 世纪 80 年代以来,大量数值方法被相继提出,主要包括变分法^[11-12]、有限差分法^[13]、矢量伪谱法^[14]、有限元法^[15-16]等,但这些数值方法仅适用于均匀各向异性光波导。然而,一般情况下液晶光波导都具有锚定层,根据 Freedericksz 转变^[17],当外加电压使液晶分子指向矢旋转时,其旋转角是沿外加电场方向渐变的,因此并不能通过上述数值方法分析液晶光波导的模场分布。至今,横向各向异性液晶光波导中的场分量间关系仍不清晰。此外,参考文献[14]推测出液晶光波导中本征模场的模内场分量间存在相关性,但并未给出相应的定量关系。因此,为了得到液晶光波导中的模内场分量间的定量关系,本文首先从麦克斯韦方程组推导出向列相液晶的各向异性电磁场耦合方程,并得出非寻常光本征模式的场分量间比值与指向矢旋转角间的定量变化规律。考虑到液晶指向矢旋转角由外加电压确定,因此,可进一步得出本征模内场分量之间的振幅、相位的定量关系受外加电压调控的规律,并使用光学软件 OptiBPM13.1 进行数值仿真验证。

2 模内场分量间关系的理论分析

向列相液晶光波导的横截面如图 1(a)所示,向列相液晶光波导芯区的宽度为 w ,厚度为 h ,包层为各向同性材料。在液晶芯区的上下两边界均存在一层非常薄的取向层,其内表面的摩擦方向沿 x 轴方向,由于取向层的锚定作用,当未存在外加电压时,液晶分子的指向矢 $\hat{n}$ 将沿 x 轴方向排列^[18]。当在上下氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)透明电极间施加一定电压时,液晶分子指向矢 $\hat{n}$ 将绕 z 轴在 xoy 平面内旋转,如图 1(b)所示, $\alpha(y)$ 为液晶分子旋转角。根据 Frank-Oseen 连续弹性体理论^[19]和欧拉-拉格朗日变分理论^[20]可知 $\alpha(y)$ 通过式(1)确定。

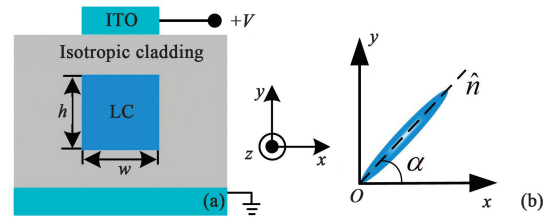


图 1 (a)液晶光波导横截面示意图;(b)液晶分子旋转示意图。

Fig.1 (a) Schematic diagram of the cross-section of liquid crystal optical waveguide; (b) Schematic diagram of liquid crystal molecular rotation.

$$\frac{y}{h} = \frac{V_c}{\pi V} \int_0^{\alpha(y)} \frac{\cos^2 \varphi + (K_{33}/K_{11}) \sin^2 \varphi}{\sin^2 \alpha_m - \sin^2 \varphi} d\varphi, \quad (1)$$

式中, K_{11} 、 K_{33} 为 Frank 弹性常数, V 为外加电压, α_m 为液晶分子最大旋转角。 $V_c = \pi \sqrt{K_{11}/(\epsilon_0 |\Delta \epsilon|)}$ 为

阈值电压,其中 $\Delta\epsilon$ 为液晶的介电各向异性, ϵ_0 为真空中的介电常数。利用旋转矩阵可得实验室坐标系 xyz 下液晶芯的介电张量为:

$$\epsilon = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{xx}(y) & \epsilon_{xy}(y) & 0 \\ \epsilon_{yx}(y) & \epsilon_{yy}(y) & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} \epsilon_{xx}(y) = \epsilon_{\parallel} \cos^2 \alpha(y) + \epsilon_{\perp} \sin^2 \alpha(y) \\ \epsilon_{xy}(y) = \epsilon_{yx}(y) = (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}) \cos \alpha(y) \sin \alpha(y) \\ \epsilon_{yy}(y) = \epsilon_{\perp} \cos^2 \alpha(y) + \epsilon_{\parallel} \sin^2 \alpha(y) \\ \epsilon_{zz} = \epsilon_{\perp} \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $\epsilon_{\parallel}$ 、 $\epsilon_{\perp}$ 分别表示光学频率下平行和垂直液晶分子长轴的相对介电常数。联合式(1)~(3)即可得到任意外加电压下的液晶介电张量分布。

另一方面,根据麦克斯韦方程组,非磁各向异性电介质的磁场矢量波动方程为^[21]

$$\nabla \times [\epsilon_0 \epsilon^{-1} \cdot (\nabla \times \vec{H})] = k_0^2 \vec{H}, \quad (4)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中传播常数, λ_0 为真空中的波长。假设入射光波为单色平面波,并且 z 轴正方向为光传输方向,相位因子为 $\exp(-j\beta z)$, β 为纵向传播常数。联合式(2)和式(4)以及 $\nabla \cdot \vec{H} = 0$ 可得液晶芯中横向磁场分量间的耦合本征方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{yy}(y)}{\epsilon_{zz}} \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + \frac{\epsilon_{yx}(y)}{\epsilon_{zz}} \frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} + \\ & [k_0^2 \epsilon_{yy}(y) - \beta^2] H_x = \left[\frac{\epsilon_{yy}(y)}{\epsilon_{zz}} - 1 \right] \frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y} + \\ & \frac{\epsilon_{yx}(y)}{\epsilon_{zz}} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + k_0^2 \epsilon_{yx}(y) H_y, \quad (5) \\ & \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\epsilon_{xx}(y)}{\epsilon_{zz}} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{xy}(y)}{\epsilon_{zz}} \frac{\partial^2 H_y}{\partial x \partial y} + \\ & [k_0^2 \epsilon_{xx}(y) - \beta^2] H_y = \left[\frac{\epsilon_{xx}(y)}{\epsilon_{zz}} - 1 \right] \frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} + \\ & \frac{\epsilon_{xy}(y)}{\epsilon_{zz}} \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + k_0^2 \epsilon_{xy}(y) H_x, \quad (6) \end{aligned}$$

将式(6)乘 $\tan \alpha(y)$ 后与式(5)相加并整理可得:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_x}{\partial y^2} + (k_0^2 \epsilon_{\perp} - \beta^2) H_x = \\ & -\tan \alpha(y) \left[\frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (k_0^2 \epsilon_{\perp} - \beta^2) H_y \right], \quad (7) \end{aligned}$$

根据本征模场理论^[22]可将式(7)改写为:

$$\begin{aligned} & (k_{x\xi}^2 + k_{y\xi}^2 + \beta_{\xi}^2 - k_0^2 \epsilon_{\perp}) H_{x\xi} = \\ & -\tan \alpha(y) (k_{x\xi}^2 + k_{y\xi}^2 + \beta_{\xi}^2 - k_0^2 \epsilon_{\perp}) H_{y\xi}, \quad (8) \end{aligned}$$

式中, k_x 、 k_y 分别表示 x 、 y 方向的横向传播常数,下标 $\xi = o, e$ 分别对应液晶中的寻常光波和非寻常光波。对于 e 光,根据菲涅尔折射率椭球^[17]可知,当且仅当光传输方向沿着光轴时,其折射率才为 $\sqrt{\epsilon_{\perp}}$ 。根据上述,所有液晶分子的光轴始终都在 xoy 平面内,而光传输方向为 z 轴,因此,必有

$$\begin{cases} k_{xo}^2 + k_{yo}^2 + \beta_o^2 - k_0^2 \epsilon_{\perp} = 0 \\ k_{xe}^2 + k_{ye}^2 + \beta_e^2 - k_0^2 \epsilon_{\perp} \neq 0 \end{cases}, \quad (9)$$

成立。将式(9)代入式(8)可得:

$$H_{xe} = -\tan \alpha(y) H_{ye}, \quad (10)$$

式(10)表明在液晶光波导的芯区,非寻常光波所激励的本征模场的横向磁场分量之间存在如下关系:

(1)模场振幅的比值为当前液晶分子旋转角的正切函数;

(2)当液晶分子旋转角的正切函数不恒等于零时,模场之间的相位差恒为 π 。

而根据式(1)可知,液晶分子旋转角由外加电压确定,因此,非寻常光波本征模式的横向磁场分量的场间关系可被外加电压定量调控。

3 仿真实验

以液晶 5CB (4'-n-pentyl-4-cyano-biphenyl) 为例,真空波长 λ_0 设为 $1.5 \mu\text{m}$,在室温 25.1°C 下 5CB 为单轴、正性液晶,其 Frank 弹性常数 K_{11} 、 K_{33} 分别为 6.4 pN 、 10 pN ^[17],根据双系数柯西模型^[17]可知,液晶分子的主轴介电常数为 $\epsilon_{\parallel} = 2.8291$, $\epsilon_{\perp} = 2.3092$,包层折射率选择 $n_c = 1.48$,液晶芯区的尺寸 w 、 h 均为 $6 \mu\text{m}$ 。根据式(1)可得不同外加电压下液晶分子旋转角渐变曲线如图 2 所示。

从图 2 可见,当外加电压超过阈值以后,液晶分子指向矢的旋转在 y 方向是渐变的,为了能够使用软件 OptiBPM13.1 中适用于均匀各向异性光波导的算法进行求解,将渐变的液晶芯区用多层均匀的液晶层近似代替,等效模型如图 3 所示。

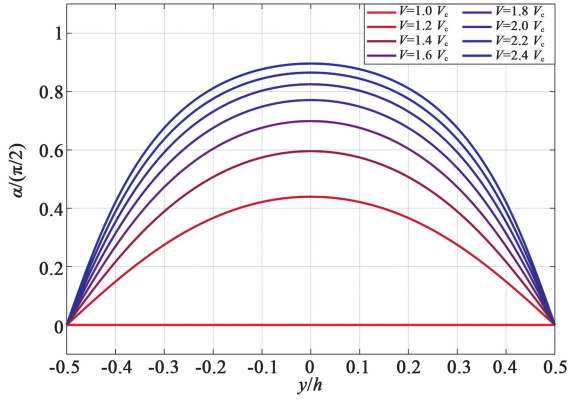


图 2 液晶分子旋转角在不同外加电压下的分布曲线

Fig.2 Distribution curves of the rotation angle of the liquid crystal molecule under different applied voltages

图 3 中,第 i 层均匀液晶层的位置 y_i 由式 (11) 确定。

$$y_i = -h/2 + (2i-1)\Delta h/2, \quad i=1,2,\dots,N, \quad (11)$$

式中, $\Delta h = h/N$ 为每一层的厚度, N 为层数。考虑到对称性, N 应为奇数。显然, N 取值越大, 这种等效模型的准确度越高。只要液晶芯区的厚度和层数确定, 即可通过式 (11) 和上述各式得到每

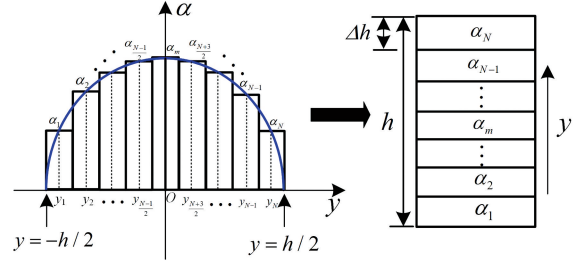


图 3 液晶芯区的多层近似模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of multilayer approximate model of liquid crystal core region

一层液晶分子的介电张量。这里选择液晶层数 $N=301$, 计算窗口为 $9\ \mu\text{m}$ 的正方形区域。当外加电压分别为阈值电压的 1.2 倍和 2 倍时, 波导横截面的介电张量分布如图 4 所示。

从图 4 (a)~(c) 和图 4 (e)~(g) 可见, 液晶介电张量在 y 方向是渐变的, 但在 x 方向却是均匀的。对于正性液晶, 非寻常光所激励的本征模式为低阶模式, 利用 OptiBPM13.1 软件求解这两个外加电压下液晶光波导中的本征模场, 图 5 和图 6 展示了外加电压分别为阈值电压的 1.2 倍和 2 倍时, 非寻常光波所激励的前 4 个模式的 $H_x, \tan\alpha(y)H_y$ 的振幅以及横向磁场分量的相位在液晶光波导芯区的分布情况。

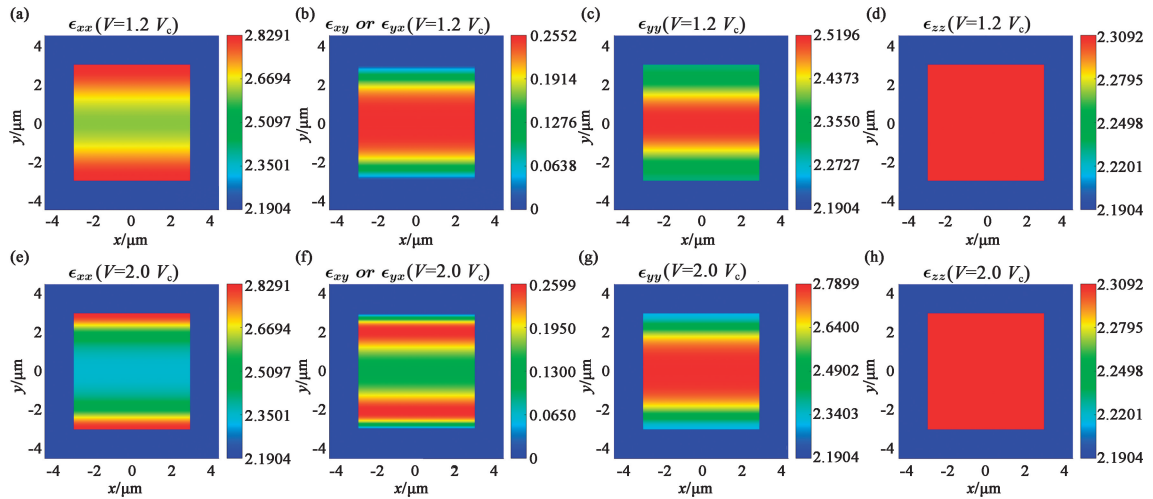


图 4 (a)~(d) 外加电压为 1.2 倍阈值时液晶介电张量的横截面分布; (e)~(h) 外加电压为 2 倍阈值时液晶介电张量的横截面分布。

Fig.4 (a)~(d) Cross-sectional distribution of liquid crystal dielectric tensor, when the applied voltage is 1.2 times the threshold voltage; (e)~(h) Cross-sectional distribution of liquid crystal dielectric tensor, when the applied voltage is 2 times the threshold voltage.

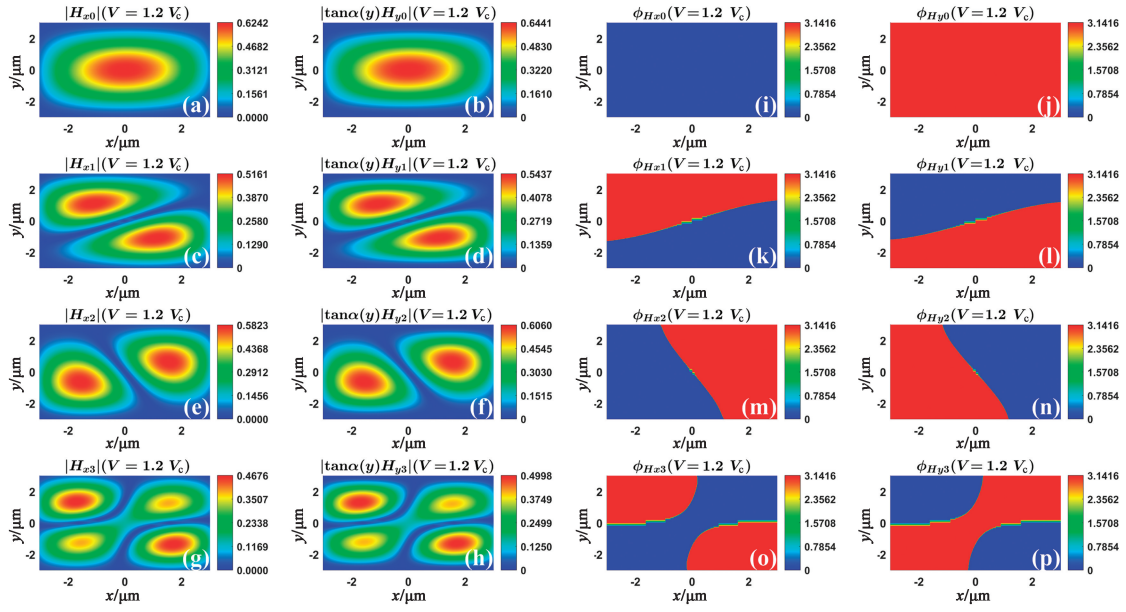


图 5 外加电压为 1.2 倍阈值时,前 4 个模式横向磁场分量在液晶光波导芯区的分布情况。(a)~(h) 振幅分布;(i)~(p) 相位分布。

Fig.5 Distribution of the transverse magnetic field components of the first four modes in the liquid crystal optical waveguide core region, when the applied voltage is 1.2 times the threshold, (a)~(h) Amplitude distribution; (i)~(p) Phase distribution.

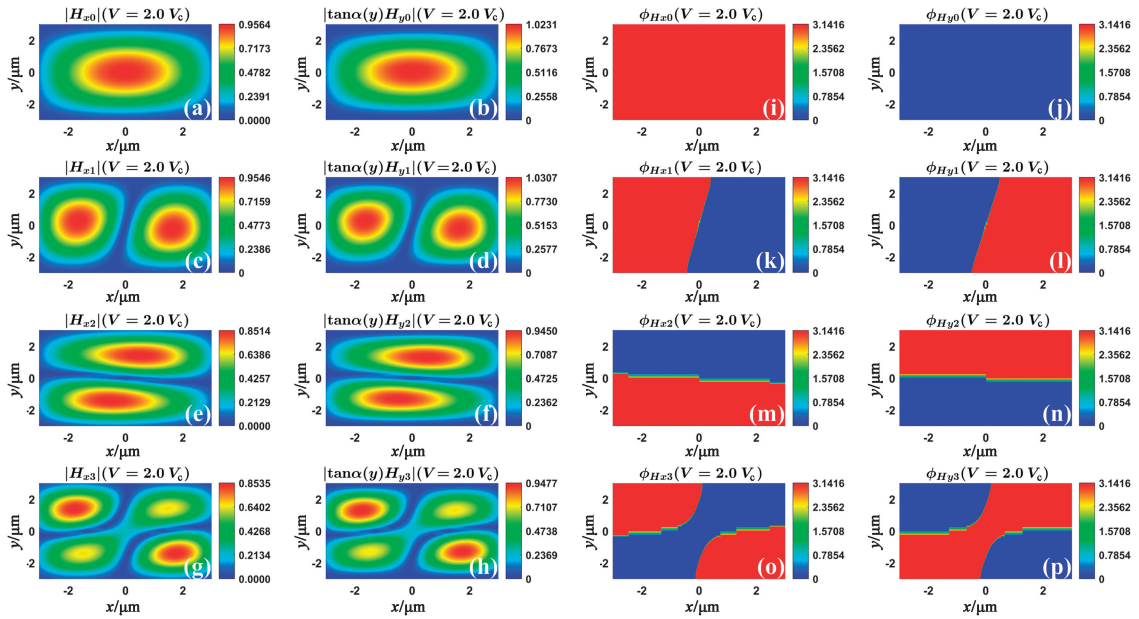


图 6 外加电压为 2 倍阈值时,前 4 个模式横向磁场分量在液晶光波导芯区的分布情况。(a)~(h) 振幅分布;(i)~(p) 相位分布。

Fig.6 Distribution of the transverse magnetic field components of the first four modes in the liquid crystal optical waveguide core region, when the applied voltage is twice of the threshold. (a)~(h) Amplitude distribution; (i)~(p) Phase distribution.

从图 5(a)~(h)和图 6(a)~(h)可以看到,对于非寻常光波所激励本征模场, $|H_x|$ 与

$|\tan \alpha(y) H_y|$ 的图案形状几乎是完全相同的,而且根据彩色条注的数值可以看到它们的数值也非

常接近,考虑到数值算法以及液晶芯的多层划分存在一定的误差,因此二者并不是完美地相等。而且从图5(i)~(p)和图6(i)~(p)可见,各阶模式的横向磁场分量在整个波导芯区上的任意一个位置上相位差几乎都为 π 。因此,式(10)所表征的横向磁场分量场间关系受液晶分子旋转角(或外加电压)调控的定量关系式是成立的。应当指出的是,尽管这里仅展示了前4个模式,但根据仿真实验结果发现,非寻常光波所激励的更高阶模仍然满足该规律。通过改变波导的宽厚比、入射波长以及材料的折射率等参数进行多次仿真实验,发现非寻常光波激励的本征模场的模内横向磁场分量之间仍然满足式(10)。

此外,将图5(a),(c),(e),(g)和图6中与之对应的子图进行比较还可以看到当外加电压更大时, H_x 的振幅也更大。这是因为随着外加电压增加,液晶分子的旋转角也增加(图2),根据式(10)可知 H_x 相对于 H_y 的振幅也随之增加。当外加电压非常接近于阈值电压或者更小的情况, H_x 相对于 H_y 的振幅非常小,此时非寻常光波所激励的本征模非常接近准横电(Transverse Electric, TE)模;随着外加电压的增加, H_x 相对于 H_y 的振幅逐渐增加,非寻常光波所激励的本征模式逐渐接近于准横磁(Transverse Magnetic, TM)模。因此,可以通过改变外加电压来实现非寻常光波所激励的偏振模式的转换,即根据式(10)所示的调控规律能够实现基于液晶光波导的电控偏振旋转器以及模式转换器。

从式(10)还可以看到当外加电压超过阈值以后,非寻常光波所激励的横向磁场分量之间的比值不仅与当前外加电压有关,而且该比值与空间变量 y 也有关系,这将导致横向磁场分量在 y 方向上的模场直径并不相等。这一现象与文献[14]中横向磁场分量间模场直径相等的结论有所不同,这是因为文献[14]中是假设所有液晶分子的场致重新取向是一致的,即并未考虑液晶指向矢的旋转是一维渐变的(本文中渐变方向为 y 方向)。

总之,在外加电压下,液晶指向矢的渐变旋转对液晶光波导的模场分布有较大的影响,适用于常规均匀各向异性光波导的数值算法并不能直接有效地分析液晶光波导中的模场分布和场间关系。

4 结 论

针对横向各向异性液晶光波导中模内场间关系并不清晰以及传统数值算法并不能直接分析具有锚定层的液晶光波导模场的情况,本文从解析上根据麦克斯韦方程组推导出液晶各向异性磁场耦合本征方程,并得出非寻常光的本征模场分量间关系受外加电压调控的定量关系式,并使用光学软件 OptiBPM13.1 进行仿真验证。结果表明,本文得出的可通过改变外加电压来定量调控液晶光波导中非寻常光波激励的偏振模式的物理规律是有效的,这一规律有助于推动基于液晶光波导的偏振旋转器和模式转换器的研究。

参 考 文 献:

- [1] DAVIS S R, ROMMEL S D, FARCA G, *et al.* A new electro-optic waveguide architecture and the unprecedented devices it enables [C]//*Proceedings of SPIE 6975, Enabling Photonics Technologies for Defense, Security, and Aerospace Applications IV*. Orlando: SPIE, 2008: 697503(1-12).
- [2] TRIPATHI U S, RASTOGI V. Liquid crystal based rib waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 4045-4051.
- [3] SHENOY M R, SHARMA M, SINHA A. An electrically controlled nematic liquid crystal core waveguide with a low switching threshold [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 1948-1953.
- [4] SHARMA M, SHENOY M R, SINHA A. A low-loss optical switch using liquid crystal core waveguide with polymer cladding [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(13): 3065-3070.
- [5] TRIPATHI U S, BIJALWAN A, RASTOGI V. Rib waveguide based liquid crystal EO Switch [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(23): 1453-1456.
- [6] XU Y, UDDIN M A, CHUNG P S, *et al.* Fabrication of a polymer based variable optical attenuator using liquid crystal cladding on inverted channel waveguide structure [C]//*Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*. Sydney, Australia: IEEE,

- 2008: 1-2.
- [7] 余晓畅, 许雅晴, 蔡佳辰, 等. 可调微纳滤波结构的研究进展[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1069-1088.
YU X C, XU Y Q, CAI J C, *et al.* Progress of tunable micro-nano filtering structures[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1069-1088. (in Chinese)
- [8] KABANAVA V S, RUSHNOVA I I, MELNIKOVA E A, *et al.* Nematic liquid crystal waveguides for spatial control of linearly polarized light waves [C]//2019 *Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring)*. Rome, Italy: IEEE, 2019: 3832-3835.
- [9] HAMEED M F O, HUSSAIN F F K, OBAYYA S S A. Ultracompact polarization rotator based on liquid crystal channel on silicon [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(11): 2190-2199.
- [10] LI T H, CHEN Q M, ZHANG X M. Electrically controlled polarization rotator using nematic liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 32317-32323.
- [11] OHTAKA M, KOBAYASHI T. Vector variational analysis of the guided modes in the three-dimensional anisotropic optical waveguides [J]. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, 1986, 69(8): 1-10.
- [12] ANGKAEW T, MATSUHARA M, KUMAGAI N. Finite-element analysis of waveguide modes: a novel approach that eliminates spurious modes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1987, 35(2): 117-123.
- [13] FALLAHKHAIR A B, Li K S, MURPHY T E. Vector finite difference modesolver for anisotropic dielectric waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(11): 1423-1431.
- [14] HUANG C C. Modeling mode characteristics of transverse anisotropic waveguides using a vector pseudospectral approach [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26583-26599.
- [15] LIU N, CAI G X, ZHU C H, *et al.* The mixed finite-element method with mass lumping for computing optical waveguide modes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(2): 187-195.
- [16] BEECKMAN J, JAMES R, FERNANDEZ F A, *et al.* Calculation of fully anisotropic liquid crystal waveguide modes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(17): 3812-3819.
- [17] 杨登科, 吴诗聪. 液晶器件基础[M]. 郭太良, 周雄图, 译. 北京: 科学出版社, 2016.
YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. GUO T L, ZHOU X T, trans. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [18] 王瑞, 吴双红, 汪相如, 等. 中红外液晶光学移相器的相位调制和响应时间特性[J]. 液晶与显示, 2021, 36(10): 1369-1376.
ANG R, WU S H, WANG X R, *et al.* Phase modulation and response time characteristics of mid-infrared liquid crystal optical phase shifter[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2021, 36(10): 1369-1376. (in Chinese)
- [19] KHOO I C. *Liquid Crystals* [M]. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [20] 钱伟长. 变分法及有限元[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
QIAN W C. *Variational Method and Finite Element Method* [M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [21] LU Y, FERNANDEZ F A. An efficient finite element solution of inhomogeneous anisotropic and lossy dielectric waveguides [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1993, 41(6): 1215-1223.
- [22] CHEN C L. *Foundations for Guided-Wave Optics* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

作者简介:



查正桃(1997—),男,四川自贡人,硕士研究生,2020年于西华师范大学获学士学位,主要从事波导光学的理论与技术的研究。E-mail: zaktao@sina.cn



张谦述(1974—),男,四川自贡人,博士,副教授,2010年于电子科技大学获博士学位,主要从事光通信与集成光学、微波光子学、集成光波导器件的理论与技术等方面的研究。E-mail: jack-yzhang@cwnu.edu.cn