

doi: 10.3788/gzxb20144302.0223002

新型液晶光学相控阵的特性研究

戴竞¹, 张敏明¹, 何岩², 刘德明¹

(1 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2 烽火通信科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘 要:将液晶作为平板光波导的上包层, 构建了液晶光学相控阵器件. 根据 Frank-Oseen 液晶连续体弹性形变理论与光栅衍射理论, 研究分析了基于这种新型结构下液晶光学相控阵的传输特性, 输出衍射特性和其它性能特性. 研究表明, 器件的传输电控相位延迟可以实现更大的光程差; 阵列电极周期数目、电极宽度、电极间隔宽度等结构参量对器件的输出衍射光束的光强分布和半峰值全宽度影响很大, 同时光束扫描的可行性得到论证; 器件的响应时间提高了一个数量级, 且其色散性能获得改善. 为以后研制新型液晶光学相控阵提供了理论基础与技术设计依据.

关键词:光学相控阵; 液晶; 光栅; 衍射; 扫描; 响应时间; 色散

中图分类号: TN252 ; O753

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0223002-6

Study on Characteristics of a Novel Optical Phased Array based on Liquid Crystal

DAI Jing¹, ZHANG Min-ming¹, HE Yan², LIU De-ming¹

(1 School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 FiberHome Telecommunication Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: A novel optical phased array based on Liquid crystal was studied, and its structure scheme feature is a planar waveguide with liquid crystal cladding. Propagation, output diffraction characteristics and other performances of liquid crystal-optical phased array were all studied and analyzed according to Frank-Oseen continuum elastic theory and grating diffraction theory. The research results show that the electrical control phase delay of the device is quantitatively analyzed to obtain larger optical path difference; the period number of electrodes, electrode width, spacing of adjacent electrodes of the device are of great effect on the intensity distribution and the full width at half maximum of output diffraction beam, and the feasibility of beam scanning is also demonstrated; this novel structure could improve the response time for an order of magnitude as well as wavelength dispersion of the device. These theoretical basis and technical design basis are favour of developing this novel liquid crystal-optical phased array in the future.

Key words: Optical phased array; Liquid crystal; Grating; Diffraction; Scanning; Response time; Dispersion

OCIS Codes: 230.2090; 160.3710; 350.2770; 050.1940

0 引言

光学相控阵技术(Optical Phased Array, OPA)^[1]

至今已经发展了 30 年, 特别是现已商用的硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)光学相控阵技术能够较好地实现非机械性地光束偏转作用, 在激光通信、

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61107051)、国家高技术研究发展计划(No. SS2012AA010407)、国家科技支撑计划项目(2012BAH06B03)和湖北省自然科学基金重点项目(No. 2011CDA114)资助

第一作者: 戴竞(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光通信器件技术. Email: daijing@hust.edu.cn

导师(通讯作者): 张敏明(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光通信与光网络技术. Email: mmz@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2013-06-03; **录用日期:** 2013-08-08

<http://www.photon.ac.cn>

光脉冲整形、光信息处理与存储、生物医学成像及光谱学等领域都有着广泛的应用前景。目前常用的是电光调制器阵列,电光材料除了液晶(Liquid Crystal, LC),还包括其他电光材料,例如铌酸锂(LiNbO_3)^[2]晶体,砷化镓/砷化铝镓($\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$)^[3]化合物,掺镧锆钛酸铅(PLZT)^[4]压电陶瓷,这三种材料尽管调制速率很高,但缺点是尺寸大。LC的优点是尺寸小,低驱动电压,电光系数高,可实现器件的集成化,功耗低的特点,已用于各种基于液晶材料的电光器件^[5-6]。其中,用液晶相控阵实现波束控制已成为激光雷达和自由空间光通信技术发展的重要趋势之一。

传统的液晶光学相控阵技术(Liquid Crystal Optical Phased array, LC-OPA),光波是穿过玻璃板之间的液晶层、透明电极、偏振器。因此,对于传统的液晶光相控阵技术,有两个重要的限制因素^[7]:1)由于光波须穿过透明电极,因此会限制输出光的总功率;2)液晶层厚度受限,一般都是 $5\ \mu\text{m}$ 。如果增加液晶层厚度,势必导致器件性能响应时间慢,传输不透明。

为了克服传统液晶光学相控阵中的缺点,本文利用基于液晶上包层的平板波导结构^[7-8],构建了新型液晶光学相控阵列器件结构。对光波在新型液晶光学相控阵的传输特性与输出衍射特性以及结构参量对光束扫描的影响进行了理论研究。相比较传统液晶光学相控阵,新结构中由于液晶层厚度更薄,从而可以提高器件的响应时间;并且可实现更大的光程差,从而可以改善其色散性能。为研制新型液晶光学相控阵提供了理论基础,并得到了一些具有实际意义的结论。

1 器件结构与工作原理

利用液晶作为平板光波导上包层构成的平板光子-液晶波导结构^[7-8]见图1,该平板波导结构从下至上主要由6层构成:导电基底、较低折射率的波导下包层、波导芯层、由液晶构成的较低折射率的波导上包层、电极层和绝缘玻璃薄板。液晶取向层厚度很薄,可以忽略不计。

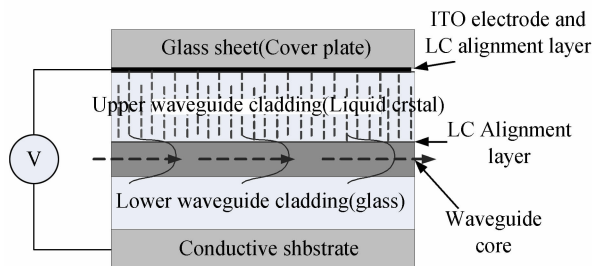


图1 基于液晶上包层的光波导的侧面

Fig. 1 A side view of optical waveguide with upper liquid crystal claddings

如果不加电,入射光波在波导中以某个有效折射率传播。当电极层某个电极施加某个电压值,该电极对

应区域的液晶折射率发生改变,那么波导的导模有效折射率也会随之变化,达到调整光信号相位的目的。

如图2所示,在该平板波导上放置平行的相同条形电极,即图中的灰色阴影部分。以此构成液晶相控阵中的液晶光栅。

整个液晶光栅包含 N 个电极单元。液晶光栅内每个电极上电压不同,则对应区域的液晶折射率发生改变,那么波导的TM模式偏转光的导模有效折射率也会随之变化,则不同电极对应区域对入射偏振光引入的相位就不同。因此可以对液晶光栅各个电极施加合适的电压,使不同电极对应区域引入的相位呈阶梯形分布,形成一个光栅,从而实现光束偏转^[9]。

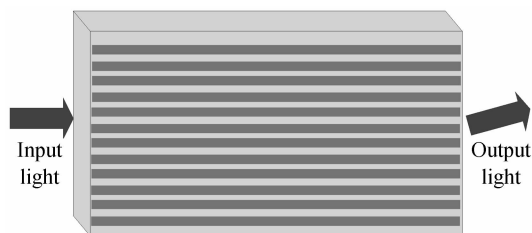


图2 新型液晶光学相控阵器件结构

Fig. 2 Schematic of the novel LC OPA

相比较于LCoS型的相控阵,最大的区别在于入射光波是不穿透液晶层,且光程正比于条形电极长度(平板波导长度),而与液晶层厚度无关。

2 理论基础

新型液晶光学相控阵的工作原理^[10]是基于相位光栅衍射理论。同时液晶分子在电场作用下的分布状态以及相应状态下对入射光波的相位调制是基于液晶理论,液晶光学双折射相关理论给出不同分子指向矢下的液晶折射率分布。

2.1 液晶分子指向矢在电场中的分布

基于Frank-Oseen液晶连续体弹性形变理论^[11-12],可以获得液晶分子在电场下的分布模型;液晶分子的指向矢为: $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 。液晶的吉布斯自由能表示为

$$f_G = \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2 - \frac{1}{2} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E})^2 \quad (1)$$

基于给定液晶的表面能、预倾角、弹性系数、介电常量、双折射系数、电极尺寸等参量,可以计算液晶层分子指向矢在电场中分布。

2.2 液晶光学理论

液晶是具有各向异性的性质,通常设液晶的指向矢为液晶的长轴方向,而液晶中的分子长轴方向具有非常折射率的 $n_{//}$,垂直分子长轴方向具有寻常折射率 n_{\perp} 。

当入射光与液晶指向矢成 θ 角时,先可将光分成

偏振互相垂直的两个偏振光,其中一偏振 o 光对应的折射率为 $n_o = n_{\perp}$,另一偏振 e 光对应的折射率为

$$n_e(\theta) = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \sin^2 \theta + n_{\parallel}^2 \cos^2 \theta}} \quad (2)$$

由于液晶具有晶体的双折射特性,而且在加电压下液晶分子结构会发生扭转,所以会产生电致双折射效应(Electrically Controlled Birefringence, ECB).

2.3 光栅衍射理论

根据光学衍射相关理论^[13-14],假设入射平面光波通过液晶光栅后出射光波的光场分布函数为 $T(x)$. 单个的光栅衍射单元的透射率函数 $C_k(x)$ 仅仅是相位不同,相邻衍射单元相位差为 $\Delta\varphi$.

$$C_k(x) = \exp(ik\Delta\varphi) \quad (3)$$

则整个液晶光栅的光波透射函数为

$$T(x) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{x-kd}{a}\right) C_k(x) \quad (4)$$

式中 a 为衍射单元/电极宽度, d 为相邻电极的中心间距, N 为阵列电极的数目. 出射的远场分布为 $E(x)$, 可以通过出射光波光场分布函数 $T(x)$ 的傅里叶变换得到

$$E(x) = FT\{T(x)\} \quad (5)$$

$$\text{则最后衍射光强分布 } I = E(x) \cdot E^*(x) \quad (6)$$

3 液晶相控阵的传输特性

器件设计中平板波导芯层为 Si_3N_4 材料, $n = 2.0$; 下包层为 SiO_2 , $n_s = 1.49$, 上包层为液晶 LC, $n_{\perp} = n_o = 1.51$, $n_{\parallel} = 1.71$. 所使用的液晶材料用向列型的液晶 E7.

为了实现平板波导的单模传输条件,芯层的厚度设计约为 500 nm ,工作波长 λ_0 是 $1.55 \mu\text{m}$.

改变电极施加电压,计算得单个电极处波导横截面折射率分布计算结果曲线如图 3,表明电压变化可控制液晶上包层的折射率变化.

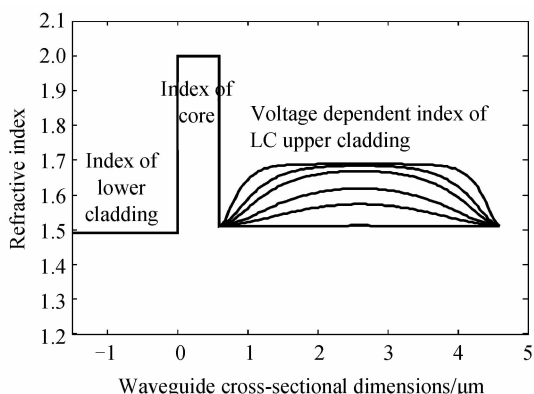


图 3 不同电压下液晶平板波导横截面折射率分布

Fig. 3 The calculated index profile of an LC clad waveguide for different applied voltages

波导上包层折射率变化进而会改变平板波导中入射 TM 光的导模传输折射率,依据平板光波导理论^[15],理论计算得到其传输导模折射率变化曲线结果

如图 4.

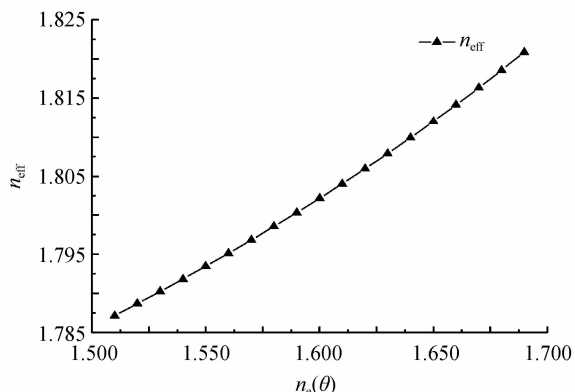


图 4 液晶平板波导导模折射率变化曲线

Fig. 4 The refractive index profile of the guide mode of the LC clad waveguide

计算可知,平板波导传输的等效折射率变化值可达 0.04 . 该结构器件的光传输相位正比于与波导长度,所以通过增加平板波导/条形电极的长度,可以提高其光程差. 假设波导电极长度为 1 cm ,光波长为 $1 \mu\text{m}$,那么即便导模传输等效折射率变化为 0.02 ,其带来的光程差为 200λ ,即 $200 \times 2\pi$ 的相位差.

对比于传统的 LC-OPA,由于液晶层厚度限制,典型的液晶盒厚度是 $5 \mu\text{m}$ 左右,相位差 2π .

4 液晶相控阵的衍射特性

对于图 2 中的新型光学相控阵列,令 N 代表光栅内的阵列电极数, a 代表每个阵列电极的宽度, d 代表阵列电极之间的中心间距, L 代表阵列电极的长度, Δn_{eff} 代表相邻单元间的传输导模的折射率差, $\Delta\varphi$ 代表相邻单元间的光传输的相位差, λ_0 为入射光波长.

对于液晶光学相控阵,最直接的特性指标就是衍射光场分布. 图 5 为 $N=20$, $a=1 \mu\text{m}$, $d=1.8 \mu\text{m}$, $L=5 \text{ mm}$, $\Delta n_{\text{eff}}=0$ 即还未有相位差 $\Delta\varphi=0$ 时,器件的输出光场强度分布.

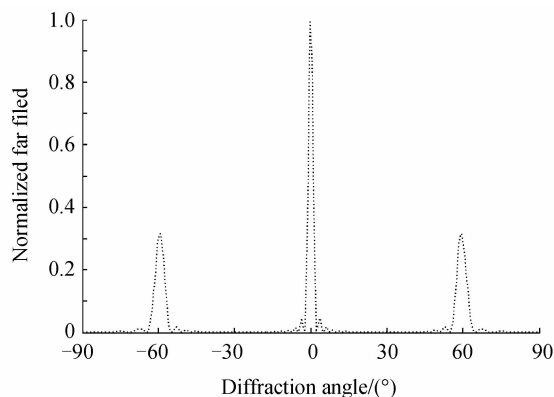


图 5 无相位差远场输出衍射的归一化光强分布

Fig. 5 Normalized far field diffraction pattern for no phase difference

衍射光场分布不仅包括光束的光强分布,还有辐

射光的半峰值全宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM),扫描范围等. 器件的结构参量对其影响很大,其中包括液晶单元电极的宽度,电极之间的中心间距,阵列电极数.

4.1 N对衍射特性的影响

对于液晶光学相控阵衍射光强度空间分布最主要的特性是主瓣的FWHM,它定义为辐射光强的半峰值全宽度^[10],即

$$\Delta\theta \approx \lambda / Nd \quad (7)$$

图6是 $a = 1.0 \mu\text{m}$, $d = 1.8 \mu\text{m}$, $L = 5 \text{ mm}$, $\Delta n_{\text{eff}} = 0$, N 从4到20变化时,主瓣衍射的FWHM值随电极数 N 的变化关系.

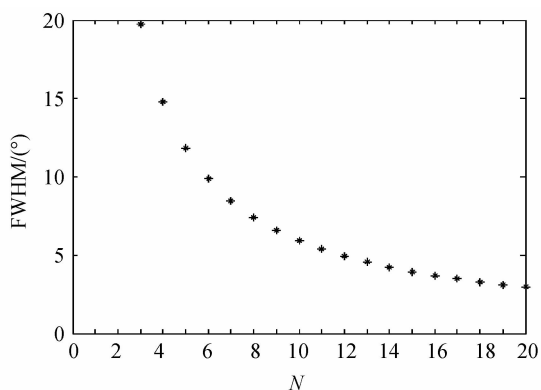


图6 FWHM与N的关系

Fig. 6 The relation of FWHM versus N

图6表明FWHM值随阵列电极数的增加而减少,即表示衍射能量越来越集中.同时也表明每次扫描移动的角度越少,光束扫描的分辨率越大,这与理想的光栅衍射理论一致.

4.2 填充比 a/d对衍射特性的影响

理论可知 d 决定了空间的扫描范围,理想的光栅衍射理论中扫描范围值约为 λ/d .而在理想液晶相控阵中,尽量使得电极间的间距忽略不计,即 $a/d \sim 1$.令 a/d 为填充比.

图7为相同偏转角(相位差 $\Delta\varphi$ 为1rad)时,在不同填充比情况下的远场光强分布计算结果.其中 $d =$

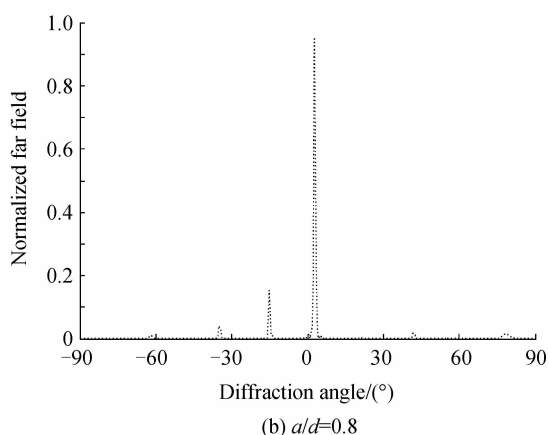
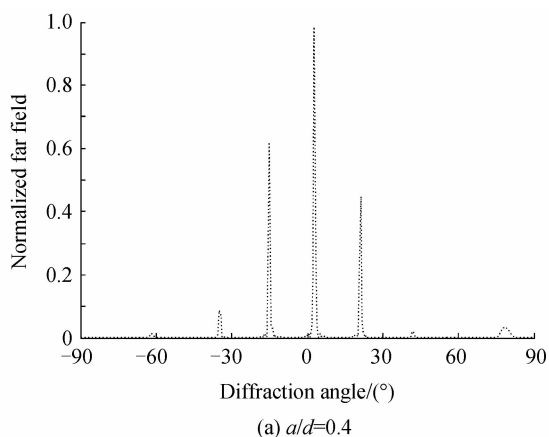


图7 不同填充比 a/d 下的衍射的归一化光强分布

Fig. 7 Normalized far field diffraction pattern at different a/d $5 \mu\text{m}$, $L = 5 \text{ mm}$, $\Delta\varphi$ 为 1 rad, $N = 20$. 由图7可见,随着填充比的减小,即液晶相控阵衍射单元之间的间隔相对于衍射单元尺寸增大,远场光强分布的旁瓣越来越多,所带来的能量损耗也就越来越大,衍射效率越来越低.

4.3 相位差 $\Delta\varphi$ 对辐射特性的影响

图8为 $N = 20$, $a = 4.0 \mu\text{m}$, $d = 5.0 \mu\text{m}$, $L = 5 \text{ mm}$, 相邻衍射单元的相位差分别设置为 1.5 rad 和 2.5 rad 时,远场光强分布计算结果图.

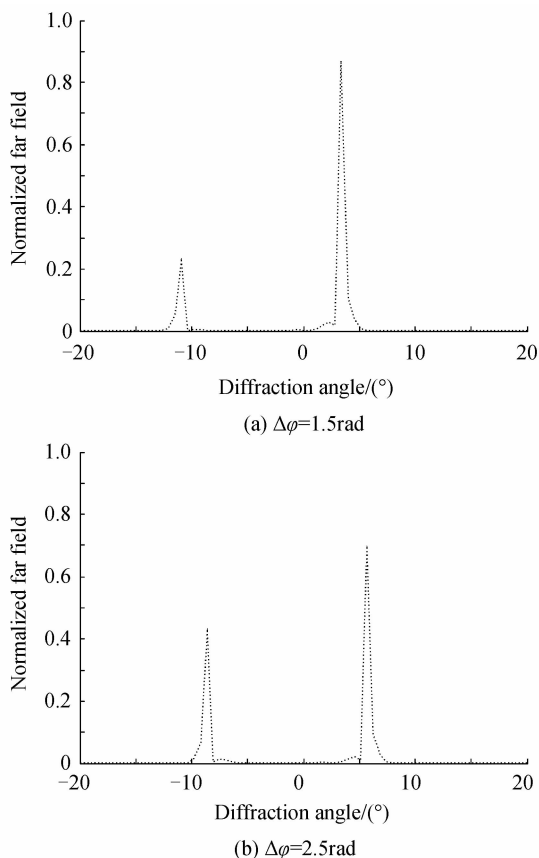


图8 不同 $\Delta\varphi$ 下的衍射的归一化光强分布图

Fig. 8 Normalized far field diffraction pattern at different $\Delta\varphi$

由图 8 可知,该器件分别可以实现光束偏转角为 3° 和 6° . 所以通过调节施加在电极上的电压大小改变,改变相邻单元的相位差,可以使辐射光的主瓣按要求发生偏转,进而实现光束的空间扫描.

5 液晶相控阵的其他性能

5.1 器件的响应时间

液晶相控阵器件的响应时间^[16]由液晶分子的响应时间决定,即液晶分子取向重新排列的时间,包括有电场上升时间和衰减下降时间.

向列液晶的衰减下降时间: $\tau_d = t^2 \gamma / k \pi^2$, 其中 t 是液晶层/盒的厚度, γ 为粘性系数, k 是有弹性常量值(一般可用 k_{11} 替代).

上升时间: $\tau_r = t^2 \gamma / V^2 \epsilon_0 \Delta \epsilon$, 其中 V 是电极施加电压, 门限电压为 $V_r = \pi \sqrt{k_{11} / \Delta \epsilon}$.

因此总的响应时间为

$$\tau = \tau_d + \tau_r = t^2 \gamma / k \pi^2 + t^2 \gamma / V^2 \epsilon_0 \Delta \epsilon \quad (8)$$

将液晶相关参量代入式(8), 计算得结果如图 9. 施加电压为 5 V 时候, 液晶层厚度 t 变化时, 器件总响应时间变化曲线.

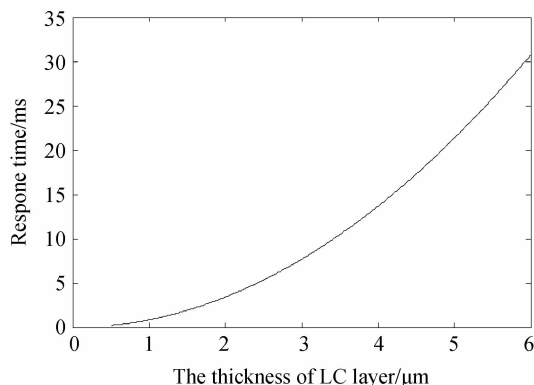


图 9 响应时间与液晶厚度的关系

Fig. 9 The relation of response time versus LC thickness

传统 LC-OPA 液晶盒厚度典型值为 $5 \mu\text{m}$, 响应时间为 25 ms.

基于本文提出的结构, 当液晶层作为上包层时, 可以减少其厚度, 根据倏逝场的作用, 厚度为输入波长量级即可, 若厚度 t 为 $2 \mu\text{m}$ 时, 响应时间为 3 ms, 提高了一个数量级.

5.2 器件的色散影响

色散^[17-18]在光束扫描中是个严重的问题. 若是传统的液晶光学相控阵, 由于液晶盒的厚度限制, 使用 2π 相位重置的方法形成一个周期性的闪耀光栅. 光束的实际偏转角度为

$$\theta = \theta_0 (\lambda / \lambda_0) \quad (9)$$

式中 λ_0 和 θ_0 分别是设计波长与偏转角度, λ 是实际工作的光波长.

在该新型液晶光学相控阵的设计中, 由于电极长

度可以很长从而带来很大的光程差, 故没有利用相位周期性, 近似一个棱镜. 即便使用周期性的相位重置方法, 也可以用更大的相位重置, 例如 200π 来替代 2π , 以此也减少色散的影响^[19].

6 结论

基于液晶上包层结构的平板光波导, 提出了一种新型结构的液晶光学相控阵. 文中通过光栅衍射理论、光波导理论及液晶的光学与电磁场的相关理论, 理论分析了该新型液晶光学相控阵的传输特性及其输出衍射特性. 另外也分析了该新型器件的响应时间特性和色散性能.

研究表明, 器件的传输电控相位延迟可以实现更大的光程差; 阵列电极周期数目、电极宽度、电极间隔宽度等结构参量对输出衍射光束的光强分布和半峰值全宽度影响很大; 且该器件可以克服了液晶响应慢、光束质量劣化严重缺点. 为以后研制新型液晶光学相控阵提供了理论基础.

参考文献

- [1] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, et al. Optical phased array technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, **84**(2): 268-298.
- [2] 孔勇发, 多功能光电材料: 铌酸锂晶体[M]. 科学出版社, 2005.
- [3] WIGHT D R, Novel phased array optical scanning device implemented using GaAs/AlGaAs technology[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **59**(8): 899-901.
- [4] GOLDRING D, ZALEVAKY Z, GOLDENBERG E, et al. Optical characteristics of the compound PLZT[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(32): 6536-6543.
- [5] WANG Xin-quan, HUANG Min, GAO Xiao-hui, et al. Portable multispectral imager based on LCTF[J]. *Acta Photoanica Sinica*, 2010, **39**(1): 71-75.
王新全, 黄旻, 高晓慧, 等. 基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 71-75.
- [6] REN Guan-jun, YAO Jian-quan. Voltage-tunable liquid crystal filter[J]. *Acta Photoanica Sinica*, 2010, **39**(5): 789-791.
任广军, 姚建铨. 液晶电控调谐滤波器的研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 789-791.
- [7] SCOTT R D, SCOTT D R, GEORGE F, et al. A new electro-optic waveguide architecture and the unprecedented devices it enables[C]. SPIE, 2008, **6975**: 697503-697503-12.
- [8] XU Y, UDDIN M, CHUNG P, et al. Polymer planar waveguide device using inverted channel structure with upper liquid crystal cladding[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(10): 7837-7843.
- [9] ZHANG Cui-yu, HUANG Zi-qiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231-1235.
张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1231-1235.
- [10] LIANG Hua-wei. Theory and experiment study on waveguide optical phased array technology[D]. Xidian University 2007.
梁华伟. 光波导光学相控阵技术的理论和实验研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.
- [11] XU L, ZHANG J, WU L Y. 2D director calculation for

- liquid crystal optical phased array[C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, **13**: 450-453.
- [12] WANG Xing-hua, WANG Bin, BOS Philip J. *et al.* Modeling and design of an optimized liquid-crystal optical phased array[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(7): 073101-073101-8.
- [13] LIANG Hua-wei, SHI Shun-xiang, LI Jia-li. Study on characteristics of an optical waveguide array in a novel type of electro-optic scanners[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1654-1658.
梁华伟,石顺祥,李家立,等. 新型电光扫描器中光波导阵列特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11):1654-1658.
- [14] ZHANG Jian, XU Lin, WU Li-ying, *et al.* Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1497-1502.
张健,徐林,吴丽莹,等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8):1497-1502.
- [15] 秦政坤. 光波导简明教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2011: 59-62.
- [16] SUN Liang. The study of light-beam scanning based on optical phased array[D]. Changchun University of Science and Technology, 2008.
孙亮. 基于光学相控阵的光束扫描研究[D]. 长春理工大学, 2008.
- [17] MCMANAMON P F. Agile nonmechanical beam steering [J]. *Optics Photonics News*, 2006, **17**(3): 24-29.
- [18] MCMANAMON P F, SHI J, BOS P J. Broadband optical phased array beam steering[J]. *Optical Engineering*, 2006, **44**(12): 128004.
- [19] MCMANAMON P F, EDWARD A. Watson. Nonmechanical beam steering for passive sensors[C]. SPIE, 2008, **4369**: 140-148.