

文章编号: 0258-7025(2010)02-0325-10

液晶光束偏转技术

张 健 方 运* 吴丽莹 徐 林

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 新型光束偏转技术能够实现激光光束方向的实时可编程控制。利用基于液晶的光束偏转技术可建立无机械、低功耗、小型和轻量光束敏捷精确控制系统。综述了光束偏转技术国内外发展现状,阐述了基于液晶的光束偏转系统的原理和关键技术,以自行研制的液晶光学相控阵(LCOPA)为例说明了器件的设计与优化方法,分析了影响器件衍射效率的因素及改进措施,对提高液晶光学相控阵时间响应等性能的途径加以总结,并对基于液晶的光束偏转技术的发展方向作了展望。

关键词 光学器件;光束偏转;液晶;数字光偏转器;偏振光栅;棱镜;光学相控阵

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0325

Liquid Crystal Beam Steering Technologies

Zhang Jian Fang Yun Wu Liying Xu Lin

(*Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China*)

Abstract Novel laser beam steering technologies are capable of steering a laser beam in real-time and programmable fashion. The precision non-mechanical agile beam steering system based on liquid crystals can be established in a way of small size, light weight, and low power consumption. The research progresses of beam steering technologies at home and abroad are summarized. The principle and some key technologies of beam steering system based on liquid crystal are introduced. Taking the self-maded liquid crystal optical phased array (LCOPA) as example, the factors that affect diffraction efficiency of the device are analyzed, the methods that design and optimize the device are explained and discussed. The ways that improve the features of LCOPA are summarized including response time, dispersion, and broadband beam steering *et al.* The research trend of beam steering technologies based on liquid crystal is previewed.

Key words optical devices; beam steering; liquid crystals; digital light deflector; polarization grating; prism; optical phased array

1 引 言

光束偏转技术是指对激光光束方向精确控制的技术,它具有精确、灵巧、紧凑、保密性强等优点,在航空航天、通信、光信息处理与存储、生物医学和军事等诸多领域有着广泛的应用背景^[1~5]。光学 APT 技术是指用光学的方法对目标的捕获(Acquisition),瞄准(Pointing)和跟踪(Tracking),在星间激光通信、军事上的精确打击、激光雷达、光电对抗等方面具有广泛应用,光学 APT 技术离不开对光束方向的精确控制。传统的光束方向控制系

统离不开万向节和转台等惯性机械部件,其结构与控制复杂、笨重昂贵、功能单一,不利于微型化。而下一代航天器、卫星要求跟瞄装置必须具备体积小、重量轻、功耗小、光束方向控制精度极高(微弧度级)、保密性强、控制灵活等特点。光束偏转技术也受军事和航空航天领域对多波段、多模式传感急迫需求的驱动,才使探索非机械、纯电控的新型光束偏转技术的研究不断取得新进展^[6,7]。本文介绍了国内外新型光束偏转技术的研究动态,说明了基于液晶的光束偏转原理,论述了液晶光学相控阵

收稿日期:2009-04-22;收到修改稿日期:2009-05-20

基金项目:国家自然科学基金(60878048)资助项目。

作者简介:张 健(1944—),男,教授,主要从事光电精密测量、光学相控阵和光束控制的研究。E-mail:zjlab@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:hit_fangyun@yahoo.com.cn

(LCOPA)器件的优化设计及提高器件性能的途径,并对其发展方向作出展望。

2 新型光束偏转技术的研究状况

目前,光束偏转技术从传统机械扫描向新型机械、微机械和无机械方向发展。在功能上,新型光束偏转系统应具有可寻址、随机指向、步进和任意驻留的能力。衡量光束偏转系统性能的主要技术指标有:偏转范围、偏转精度、响应时间、光谱范围与色散特性、通光孔径和发散角等^[8]。

新型机械式光束偏转技术主要有旋转里思利(Risley)棱镜^[9,10]和偏心透镜^[9,11]两种,它们通过光学元件之间的相对运动产生旋转或横向位移来实现光束偏转。与传统万向节相比,具有无旋转光轴、偏转角大、光谱范围宽和透射率高等特点。但由于还是采用棱镜、透镜等传统光学元件,难以实现随机指向,体积、质量和功耗也没有得到改善。利用微光学元件代替传统光学元件,可以有效地减小光束偏转系统的体积、质量和功耗,如偏心微透镜阵列^[12,13]。微光学元件的制作工艺是决定其性能的关键因素^[14]。

实现非机械式光束偏转的途径有声光调制、电光调制、多量子阱、全息和液晶等多种方式。声光调制^[15]是利用光弹效应使光束偏转,其响应速度受声波制约,且有改变光波频率的缺点。电光调制^[16,17]利用泡克耳斯(Pockels)或克尔(Kerr)效应,具有响应速度快(纳秒量级)的优点,但代价是驱动电压高、功耗高。此外,电光调制器件的口径也较小。阵列式电光偏转器件^[18]和多量子阱^[19,20]的研究最近也取得较大进展,但是还处在发展初期。全息光栅法^[6,21]是在玻璃基底制作多个全息光栅,不同方向的小角度入射光束将产生不同方向的大角度出射光束,其优点是偏转角大,但前提是必须有能够产生不同入射角度的精细光束偏转机构。液晶在显示领域所起的重要作用已不言而喻。近年来,液晶在非显示领域的应用研究日益受到重视,并逐渐显现出重要和广泛的应用前景。液晶光束偏转器件就是利用液晶分子取向可电控的特性实现非机械全电控光束偏转的。由于液晶具有宽双折射范围、宽波段、低驱动电压、制造工艺成熟和高损伤阈值等优点,重量与功耗都显著减小。现有的研究成果表明,这是目前最有希望成为可实际应用的新型光束偏转材料^[1,22]。

当前任何单一的光束偏转方法都很难同时兼顾

大偏转范围与高偏转精度两个指标。为了实现大范围内的高精度光束偏转,一般采用粗偏转与精偏转结合的方式^[2,7]。通过粗偏转装置以适当的精度和速度将光束指向需要的方位,然后通过精偏转装置捕获和跟踪目标。常用的粗偏转方法有传统的万向节、新型机械法、微光学法、双折射棱镜阵列法和全息光栅法等。精偏转方法主要有传统的快速反射镜和液晶光学相控阵等。

欧美国家较早开始了对光束偏转技术的基础与应用研究。美国国防部高级研究计划局(DARPA)于1999年设立了敏捷光束控制(STAB)研究项目^[23]。其目标是开发和演示非惯性、全电控芯片级光学相控阵器件,用于激光束敏捷控制,以满足空间通信、遥感、导航以及目标探测、跟踪、光电对抗等军事应用的需求。拟采用液晶, MEMS, 谐振腔增强型光电探测器,衍射与微光学,自适应光学,量子阱微腔激光器和光子带隙材料等新技术,以达到在尺寸、重量、功耗和成本等方面相对于传统技术有极大改善的目的。对基于液晶的光束偏转技术和空间光调制器的研究已取得显著成果,一系列的基础实验证明了液晶在光谱范围、响应时间、光损伤阈值、空间抗辐射能力等方面均能满足军事和空间应用的要求。

欧洲防务局设立了先进激光光束控制技术(ATLAS)研究项目^[8],研究用于光电对抗、主动成像、目标识别、跟踪和搜索的非机械式光束方向控制和激光束整形技术,内容包括用于光束方向精细控制的电光陶瓷和用于波前校正的液晶空间光调制器;用于扩展光束偏转范围的偏心微透镜阵列以及用于激光束整形的光寻址液晶空间光调制器等。

还值得注意的是瑞典和以色列两个国家都对基于液晶的光束方向精细控制投入了较大的注意力^[19,24]。瑞典防务研究机构 FOI 在防务光子项目(Swedish Defence Photonics Project)中设立非机械光束控制技术研究课题^[19],要求开发采用非机械激光束控制的合作目标通信演示系统,并评估液晶空间光调制器用于激光束控制的可行性。

我国近年来在激光通信和空间 APT 技术等需求的牵引下,也开始注意到非机械的新型光束偏转技术的研究。西安电子科技大学的石顺祥等^[25~27]设计制作了一种基于 AlGaAs 光波导阵列电光扫描器构成的光学相控阵。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所朱成禹等^[28~31]对光学相控阵进行了初步分析和设计。中国电子科技集团公司第二十

七研究所倪树新等^[32,33]从激光雷达的角度对(液晶)光学相控阵的应用前景予以高度评价和重视。电子科技大学分别研究并制作了液晶光栅和基于PLZT铁电电光薄膜的光学相控阵^[34~37]。北京大学^[38]、清华大学^[39]和中国科学院上海光学精密机械研究所^[40]也做了一定的研究。总体看国内在这方面的研究尚处于起步阶段。

哈尔滨工业大学对光束偏转控制、液晶光学相控阵理论和关键技术方面进行了研究并取得进展^[31~52]。将光束精确控制和液晶光学相控阵的理论、方法、技术、仪器、应用作为一个整体课题对待,以期成为我国本领域的一个有贡献的组成部分。

3 基于液晶的光束偏转技术

按照偏转原理,可以将液晶光束偏转技术分为折射式和衍射式两种。按照器件结构,可以分为液晶数字光束偏转器(DLD)^[53~56]、液晶偏振光栅(PG)^[57,58]、液晶棱镜(Prism)^[59,60]和液晶光学相控阵(OPA)^[1]等。其中液晶数字光束偏转器和液晶偏振光栅适合于粗偏转,而液晶棱镜和液晶光学相控阵则适合于精偏转。

3.1 基于液晶的光束粗偏转技术

3.1.1 液晶数字光束偏转器

数字光束偏转器提供了一种实现大偏转角度的非机械偏转方法。它采用不同的光学元件来实现光束的方向控制和选择,控制器件能将光束偏转到两个可能的方向,由偏振状态转换器选择出射光束方向^[54]。将 N 个 DLD 级联就可以实现 2^N 个不同方向的光束偏转。

如图 1(a)所示,楔形液晶盒作为光束方向控制器件。当入射光束中含有与光轴平行的 e 光和垂直的 o 光两个偏振分量时,由于 o 光和 e 光的折射率

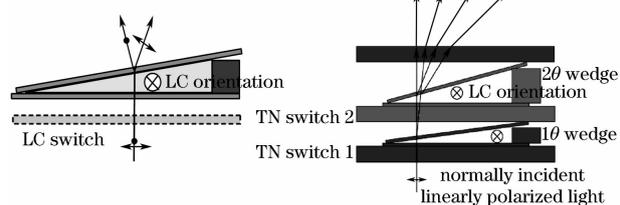


图 1 液晶数字光偏转器。(a) 基本光束偏转开关;
(b) 具有 4 个可能的偏转方向的 2 级液晶数字光偏转器
Fig.1 Liquid crystal digital light deflector. (a) basic beam steering switch; (b) two-stage liquid crystal digital light deflector, with four possible steering directions

不同,在棱镜倾斜面出射时因折射角不同而被分离,偏转角的大小取决于液晶的折射率和棱镜角。若增加液晶偏振开关,控制入射光偏振方向,如图 1(a)虚线所示,就可以在两个偏转角中选择其中之一。进一步将两个液晶数字光偏转级联使用,如图 1(b)所示,用两个液晶偏振开关的控制电压可以产生 4 个可能的光束偏转方向^[54]。

这种利用双折射使光束分离方法的弱点是,在液晶材料确定的情况下若要增大偏转角度,需要增大棱镜角,同时随着光束口径增大偏转器件口径也要增大,都会导致器件厚度增大。一种解决办法是改用小棱镜阵列,此时偏转效率将受到与棱镜阵列有关的损耗限制^[56];另外一种解决办法是改用具有低损耗、接近 100%衍射效率的液晶偏振光栅^[57]。

3.1.2 液晶偏振光栅

液晶偏振光栅通过对入射光的偏振态进行调制使光束向特定的衍射级偏转。液晶偏振光栅的结构如图 2 所示^[57,58]。光轴方向在 xy 面内的 x 方向上满足 $\mathbf{n}(x) = [\sin(\pi x/\Lambda), \cos(\pi x/\Lambda), 0]$, Λ 为光栅周期。利用光控取向技术即可实现上述指向矢二维空间分布的锚定^[57]。

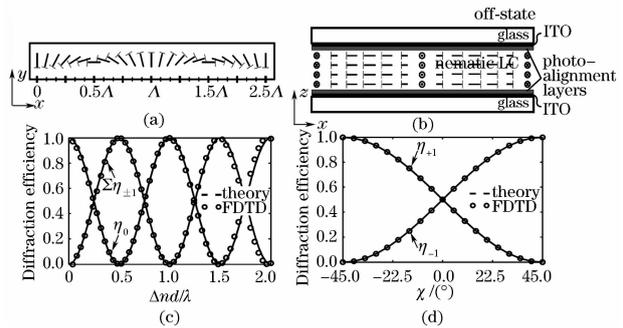


图 2 液晶偏振光栅的结构与衍射特性。(a) 俯视图结构;(b) 侧视图结构;(c) 衍射效率;(d) 一级衍射光衍射的偏振选择性

Fig.2 Structure and diffraction properties of liquid crystal polarization grating. (a) top-view geometry; (b) side-view geometry; (c) diffraction efficiencies; (d) polarization selectivity of first order

在正入射情况下,液晶光栅的理想衍射效率满足^[58]

$$\eta_0 = \cos^2(\pi \Delta n d / \lambda), \quad (1)$$

$$\eta_{\pm 1} = \frac{1 \mp S'_3}{2} \sin^2(\pi \Delta n d / \lambda), \quad (2)$$

式中 η_m 为 m 级的衍射效率, λ 为入射光波长, Δn 为液晶的双折射率, d 为液晶层厚度, $S'_3 = \sin(2\chi)$ 为

入射光椭圆偏率的归一化斯托克斯矢量。

图 2(c) 给出了衍射效率与 $\Delta nd/\lambda$ 的变化曲线, 可以看出, 通过选取合适的液晶层厚使 $d = \lambda/(2\Delta n)$, 就可使零级衍射效率为零, 所有入射光将衍射至 ± 1 级。但 ± 1 级衍射光对入射光偏振态 S'_3 高度敏感, 图 2(d) 给出了 $d = \lambda/(2\Delta n)$ 时, ± 1 级衍射效率与入射光偏振态之间的关系曲线。入射光为右旋圆偏振光时只有 +1 级的左旋圆偏振光出射; 而入射光为左旋圆偏振光时只有 -1 级的右旋圆偏振光出射。若在液晶盒上下基板间施加高于阈值电压的驱动电压, 则入射光将不受调制从而直接透过液晶层, 得到透射率接近 100% 的零级透射光。 ± 1 级衍射角由光栅方程决定

$$\sin \alpha = m\lambda/\Lambda + \sin \theta_{in}, \quad (3)$$

式中 θ_{in} 为入射光束的入射角, α 为透射光束的衍射角。利用光控取向实现固定周期的正弦分布只能有 0 级, ± 1 级 3 个偏转状态。采用负各向异性液晶材

料, 利用可电控的面内梯度变化可以实现周期的改变, 从而实现偏转角的可电控^[61]。

3.2 基于液晶的光束精偏转技术

上述液晶数字光偏转器主要用于大范围内的光束偏转, 其偏转精度有限。两个相邻偏转状态之间需要光束精偏转装置来配合以获得高偏转精度。

3.2.1 液晶棱镜

如果将图 1(a) 的楔形平板改成如图 3 所示的平行平板, 并且控制电极的材料是电阻线性分布的高阻抗透明导电薄膜, 而公共电极的材料是低阻抗透明导电薄膜^[60]。不加电压时, 液晶分子在与纸面平行的面内平行排列, 偏振方向与指向矢一致的线偏振光经过液晶盒时不发生偏转。当施加电压时, 在高阻抗透明电极上相对于公共电极产生线性减小的电压分布, 从而产生如图 3(b) 所示的液晶分子指向矢分布。平行于指向矢的入射线偏振光的等效相位延迟分布如图 3(c) 所示。

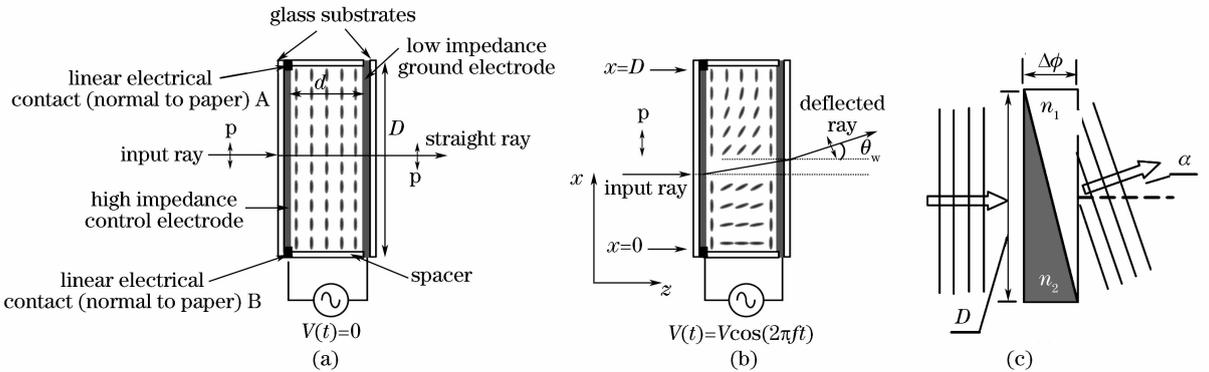


图 3 用于连续偏转的电控向列相液晶棱镜。(a) 未加电压; (b) 加电压; (c) 等效棱镜

Fig. 3 Electric controlled nematic liquid crystal prism used for continuous steering. (a) no control voltage; (b) voltage is supplied; (c) effective prism

根据各向异性晶体的折射率理论, 液晶层中任意位置处 e 光的折射率满足

$$n_e(x, z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta(x, z) + n_o^2 \sin^2 \theta(x, z)}}, \quad (4)$$

式中 θ 为液晶分子指向矢相对于 z 方向的倾角; n_o 和 n_e 分别为与液晶分子长轴方向垂直和平行方向的折射率。光波通过液晶层后, x 方向的相位延迟分布满足

$$\phi(x) = (2\pi/\lambda)n(x, z)d = (2\pi/\lambda)\int_0^d n_e(x, z)dz, \quad (5)$$

则 $x = 0$ 处相位延迟满足

$$\phi(x = 0) = \phi_o = (2\pi/\lambda)n(0)d, \quad (6)$$

而 $x = D$ 处相位延迟满足

$$\phi(x = D) = \phi_D = (2\pi/\lambda)n(D)d, \quad (7)$$

出射光的偏转角度满足

$$(2\pi D/\lambda)\sin \alpha = \Delta\phi = \phi_D - \phi_o, \quad (8)$$

该方法实现了出射角度的可电控, 并且光束能够连续偏转^[60]。

3.2.2 液晶光学相控阵

上述液晶棱镜虽然能够实现小角度范围内的光束连续偏转, 但是随着入射光口径和入射角度的增大, 要求液晶层厚度也随之增大, 从而导致响应速度下降。

液晶光学相控阵是在图 3 所示液晶棱镜基础上将控制电极离散化, 并且离散控制电极也采用低阻抗透明导电薄膜。当相移达到 2π 时使相位复位, 形成如图 4 所示的以 2π 相位延迟为复位周期的相移单元阵列^[1]。当在每个周期内的 2π 相位延迟呈线性变化时, 相移单元阵列对光波波前的作用就相当

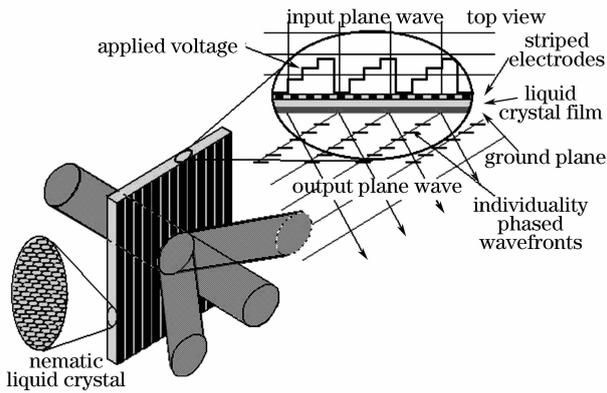


图 4 液晶光学相控阵

Fig. 4 Liquid crystal optical phased array

于施加了一闪耀相位光栅。根据光栅理论,其衍射效率 η 为

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi/q)}{\pi/q} \right]^2, \quad (9)$$

式中 q 为相位台阶数,即每个周期所包含的电极数。当 $q=8$ 时,理论衍射效率可达 95%。

通过对离散电极的驱动电压进行编程控制,改变构成 2π 复位周期内的电极数或使相位复位为 2π 整数倍,可以改变偏转角。由于电极间距小和驱动电压的分辨率高,其偏转角分辨率可达到微弧度量级,并且利用对离散电极的驱动电压可编程控制的特点,可灵活、精密地动态控制光束偏转方向,是目前液晶用于光束偏转精细控制的主要手段。

4 液晶光学相控阵器件设计与优化

液晶光学相控阵器件的设计涉及液晶材料、结构参数、驱动电压和驱动方式的设置。结构参数包括液晶层厚度、电极宽度、间距等;驱动电压包括电

压有效值、电压量化等级;驱动方式包括每个光栅周期内包含的电极数、驱动电压波形和频率等。

对于波长为 λ 的入射光,器件要求的最大偏转角为 α ,光栅周期 Λ 可以通过光栅方程(3)获得。对于已选定液晶材料的透射式液晶光学相控阵,液晶层厚度 d 必须满足 $\Delta nd > \lambda$,通常取 $\Delta nd = 1.5\lambda$ 。在光栅周期 Λ 和液晶层厚度 d 确定之后,需要确定一个光栅周期内含有的电极数 N ,电极的宽度 a 和间隔 b 。通常基于闪耀光栅原理的器件,为了获得可分辨方向的偏转角,要求每个光栅周期至少需要含有 3 个电极。在工艺条件和成本允许的情况下电极越多,偏转效率越高。间隔的大小取决于工艺水平,越小越好。

对于确定结构参数的器件,驱动电压的优化包括以下几个步骤^[62]:

1) 获取与偏转角对应的相位分布,可以通过 Gerchberg-Saxton(GS)算法等衍射光学优化算法获得;

2) 通过一维液晶指向矢模拟获取相位延迟-电压($\phi-V$)响应曲线,然后插值获得与步骤 1) 中相位分布所对应的电压分布初始值;

3) 通过二维液晶指向矢计算步骤 2) 中电压分布对应的相位分布,然后根据新的相位分布建立样条插值,获得新的电压分布,循环直至获得满意的电压分布使相位达到设计要求;

4) 通过时域有限差分(FDTD)等精确的液晶光学特性模拟方法计算最终电压分布对应的衍射效率与偏转方向。

图 5 是本文设计和研制的一维液晶光学相控阵,其中(a)为原型器件,(b)为偏转性能的测试装置,(c)为光束偏转实验测试结果。

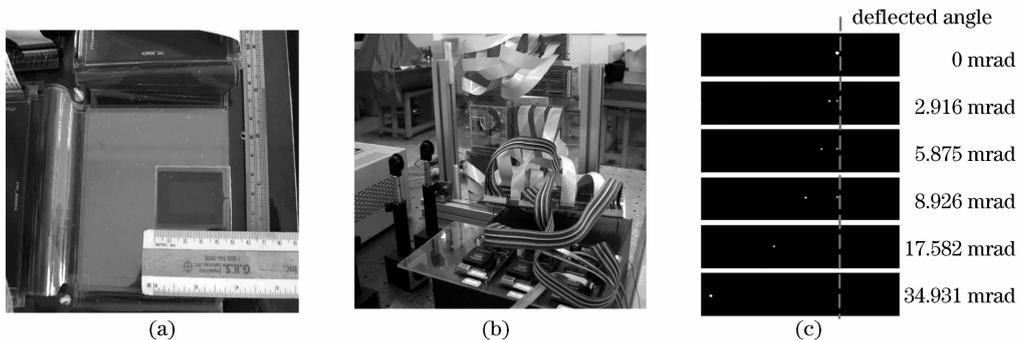


图 5 一维液晶光学相控阵

Fig. 5 One-dimensional liquid crystal optical phased array

5 液晶光学相控阵衍射效率分析

液晶光学相控阵属于衍射元件,衍射效率是决定其性能好坏的关键因素,下面结合本文的研究分

析影响衍射效率的因素。

5.1 相位延迟回程区的影响

在高分辨率液晶光学相控阵中,像素间距已经

接近光波波长。施加驱动电压时,复位处的相位不能立即从 2π 复位至 0,而是出现了如图 6 所示的缓慢下降的回程区。

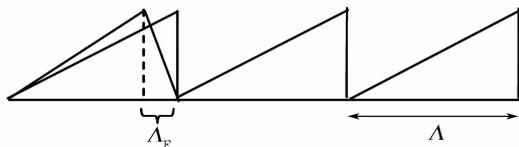


图 6 回程误差示意图

Fig. 6 Schematic view of flyback errors

回程区的存在导致了衍射效率的降低,回程区对衍射效率 η 的影响可描述为^[1]

$$\eta = (1 - \Delta_F/\Lambda)^2, \quad (10)$$

式中 Δ_F 为回程区的大小。(10) 式考虑了光栅周期,但没有考虑相位延迟形状的影响。为此,根据相位延迟与衍射效率之间的关系,推导出最大相位延迟量 ϕ_h 与回程区应满足关系^[46]

$$\phi_h = (\Lambda - \Delta_F)/\Lambda \cdot 2\pi, \quad (11)$$

由此建立衍射效率、光栅周期和最大相位延迟量三

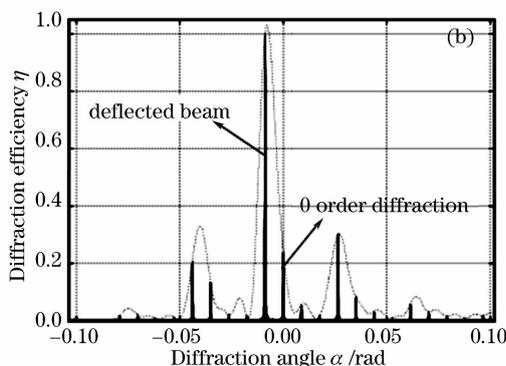
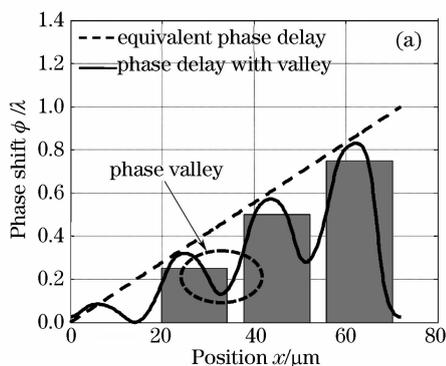


图 7 相位凹陷对衍射的影响。(a) 具有凹陷的相位延迟;(b) 平面波远场衍射图

Fig. 7 Influence of phase valley on diffraction efficiency. (a) phase delay with valley;

(b) far field diffraction pattern of plane wave

5.3 基于 FDTD 的衍射效率分析

对于高分辨率液晶光学相控阵器件,像素尺寸与光波波长大小相当。光通过器件时,需要考虑像素边缘引起的散射/衍射效应。传统的基于层状近似理论的光学特性模拟方法不能得到精确的模拟结果,需要发展和应用更加精确的电磁波传播的数值方法。目前,基于 FDTD 的液晶光学特性模拟研究大多集中在折射率分布为周期结构的器件上,需同时采用周期边界条件和总场/散射场技术来引入平面波以避免计算含有非均匀各向异性介质的连接边界上的入射场场值^[58,63]。然而,非周期结构的双折射率分布常存在于液晶光学相控阵光束偏转、全息波前变换和具有缺陷的液晶织构等情形中^[64~66]。在非周期结构器件中,周期边界条件已不再适用。

者之间的关系。通过实验,确认回程区是影响衍射效率的主要因素,电极尺寸、液晶层厚度和取向膜厚度都会影响回程区宽度。通过优化最大相位延迟量、回程区和光栅周期 3 个参数可以获取最佳衍射效率,并且最大相位延迟量并非是理论上固定的 2π ^[46]。

5.2 相位凹陷的影响

对于像素间距较大的器件,相邻像素间边缘电场的存在不仅导致出现相位复位回程区,而且在等效相位延迟面上出现了如图 7(a) 所示的相位凹陷。从单位振幅平面波经过器件后的远场衍射图 7(b) 可以看到,在偏转光束的两侧出现较强的衍射旁瓣,相位凹陷的作用就像在理想相位分布上增加了一个低通滤波器。利用相位解析法建立表示相位凹陷的解析形式数学模型,用于定量分析电极间距与相位凹陷关系,确定最佳电极尺寸与间距,以减小对衍射效率的不利影响^[44]。

通过采用总场/散射场技术,并提出了分裂场一维辅助 FDTD 方法来独立计算含有非均匀各向异性介质的左、右连接边界上的入射场场值^[52],使改进后的 FDTD 光学特性模拟方法能准确计算衍射效率和包括强度分布、偏振态、偏转角在内的偏转光束各种状态参数,为进一步优化结构参数和驱动电压提供参考依据。

6 提高液晶光学相控阵性能的研究

不同的应用对器件有不同的要求,总的来说,在满足偏转范围和偏转精度的要求下,提高衍射效率、加快响应速度、实现宽波段应用和去除对入射光偏振态的依赖性问题是当前研究的热点。受篇幅所限,这里只以时间响应特性为例说明未来改善液晶

光学相控阵性能的途径。

采用向列相液晶材料的液晶光学相控阵受材料自身特性、器件结构和驱动电压等因素的制约,响应速度一般在几毫秒至上百毫秒之间。光束快速偏转要求变换速率达到千赫兹量级,传统的向列相液晶器件不能满足上述要求。因而提高响应速度一直是液晶材料和器件的研究热点。

一种思路是提高液晶材料双折射率,降低材料的粘滞系数。在相同相位延迟情况下,高双折射率材料可减小液晶层厚,从而显著提高响应速度。美国中佛罗里达大学 S. Wu 等^[67~69]通过精细分子工程,获得了一系列高双折射率低黏度的液晶材料,其中双折射率最高可达0.7左右。

另一种思路是采用液晶/聚合物混合材料来改进液晶分子受力状态,从而增大液晶分子变形后的恢复力。传统的液晶锚定是依靠基板取向膜,对邻近取向膜的液晶分子施加锚定力,而在离取向膜远的液晶层中液晶分子受到的取向膜锚定力极其微弱,因此当变形后的液晶分子在撤除外加电场时不易恢复到初始状态。通过引入聚合物并做一定的处理,可以改变液晶分子的受力情况。提高液晶分子在外场作用下变形后的恢复力,加快响应速度。依据混合材料中聚合物浓度、类型和处理方法的不同可以分为:聚合物分散液晶(PDLC)和聚合物网络液晶(PNLC)^[70]。对于液晶/聚合物中因聚合物而带来的强散射和迟滞问题,可以通过预应力技术加以解决^[71~73]。但是液晶/聚合物提高响应速度的代价是高工作电压。

还有一种思路是通过改进驱动方式提高响应速度。因液晶是粘弹性材料,在外场作用下的变形过程与外场撤除后的恢复过程是不对称的,通常恢复时间大于变形时间。利用双频液晶(DFLC)水平介电常数 $\epsilon_{//}$ 随驱动电压频率变化而使 $\Delta\epsilon$ 的符号发生改变的特点,用一个频率的电场使液晶指向矢形变,另外一个频率电场用于辅助液晶松弛。这样可以使液晶分子在平行和垂直于电场方向上都能快速变化。与传统的向列相液晶相比,响应时间能缩短一个量级,帧频达到500 Hz甚至更高^[74,75]。

铁电液晶具有快速电光响应特性,较早就受到重视,但因只能作开关式变换而不能实现对相位延迟的连续控制,其应用范围受到限制。

此外,还有色散和宽光谱使用的问题。液晶光学相控阵采用相位“复位”的工作方式,解决了大口径大偏转角时需要极厚液晶层才能实现大相位延迟

的问题。然而, 2π 的相位复位仅对设计波长有效,对非设计波长一般均存在一个相位偏差。可以通过增大相位复位周期,使其为 2π 的 N 倍,再选取合适的倍数 N ,可以减小不同波长引起的色散^[76]。

液晶相位调制型器件虽可以获得大于 2π 相位调制量,但相位变化对入射光偏振态敏感,只有与液晶分子长轴平行的线偏振光才受电场控制。改进器件结构,使用双层调制是一种克服对偏振态依赖的有效方法。针对只有与液晶分子长轴平行的线偏振光才受电场控制的特点,可简单地将两个液晶分子长轴取向互相垂直的相位调制型光学相控阵叠在一起,则无论什么偏振方向的入射光,总可以分解成互相垂直的两个偏振分量,分别受到对应光学相控阵的相位调制。受此启发,还可以用偏振性能不同的材料制成双层式的器件^[77~79]。

液晶光学相控阵器件的口径尺寸较小,受工艺限制现有器件大多在1~4 cm之间。采用子孔径阵列方法^[80]不但可以扩大口径,而且可实现对多光束方向控制,是未来激光雷达的发展方向。图8为Raytheon公司2007年展示的7个子孔径原型阵列^[81]。

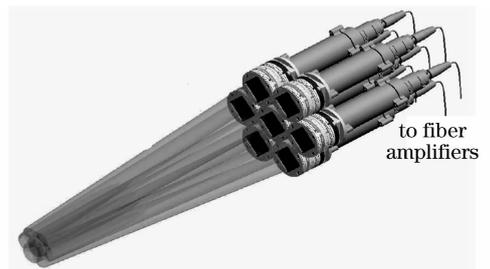


图8 含有7个子孔径阵列的阵列

Fig. 8 Seven-aperture phased array of phased arrays

7 结 论

利用液晶在电场作用下对入射光束相位可调的特点来精确控制光束偏转方向的新技术,具有非机械、无惯性运动件的优点,易于制成小体积、低功耗、无需维修、高集成度的器件和系统,对激光雷达、光学APT技术等将产生重大影响。而基于液晶的光学相控阵是目前最有希望走向实际应用的新型非机械光束偏转技术。它将经典的电磁场理论、光的衍射理论、光的双折射理论用在晶体中,产生了新器件,得到了新的重要应用。本文在阐述上述基本理论的同时,结合研究实际,说明了液晶光学相控阵器件的设计、驱动方法,做了光束偏转控制的实验,解决了部分关键技术。还对提高衍射效率、加快响应

速度、减小色散影响等相关问题作了简要讨论。液晶不仅在可见光波段有很好的应用价值,而且在毫米波,甚至在太赫兹波段也有潜在的优势,值得关注。

参 考 文 献

- P. F. McManamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2):268~298
- B. Winker, M. Mahajan, M. Hunwardsen. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications [C]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, **3**:1702~1708
- T.-H. Chao, H. Zhou, G. Reyes *et al.*. High-speed high density holographic memory using electro-optic beam steering devices [C]. *SPIE*, 2002, **4803**:70~73
- P. J. W. Hands, S. A. Tatarikova, A. K. Kirby *et al.*. Modal liquid crystal devices in optical tweezing: 3D control and oscillating potential wells [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(10):4525~4537
- B. Matkin. Steered agile beams support for army requirements [C]. *SPIE*, 2000, **3952**:4~14
- P. F. McManamon. A review of non mechanical beam steering options [C]. Conference Proceedings — Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS, 2008. 575~576
- P. F. McManamon. An overview of optical phased array technology and status [C]. *SPIE*, 2005, **5947**:594701
- H. D. Tholl. Novel laser beam steering techniques [C]. *SPIE*, 2006, **6397**:639708
- J. Gibson, B. Duncan, P. Bos. Wide angle beam steering for infrared countermeasures applications [C]. *SPIE*, 2002, **4723**:100~111
- P. J. Bos, H. Garcia, V. Sergan. Wide-angle achromatic prism beam steering for infrared countermeasures and imaging applications: solving the singularity problem in the two-prism design [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(11):113001
- J. L. Gibson, B. D. Duncan, E. A. Watson. Wide-angle decentered lens beam steering for infrared countermeasures applications [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(10):2312~2321
- A. Akatay, H. Urey. Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8):4523~4529
- J. Bourderionnet, M. Rungenhagen, D. Dolfi *et al.*. Continuous laser beam steering with micro-optical arrays: experimental results [C]. *SPIE*, 2008, **7113**:71130Z
- A. Akatay, A. Waddie, H. Suyal *et al.*. Comparative performance analysis of 100% fill-factor microlens arrays fabricated by various methods [C]. *SPIE*, 2006, **6185**:61850C
- V. Nikulin, R. Khandekar, J. Sofka *et al.*. Acousto-optic pointing and tracking systems for free-space laser communications [C]. *SPIE*, 2005, **5892**:58921C
- D. J. Chauvin. Electro-optic beam steering using domain engineered lithium tantalate [R]. AFIT/Geo/ENP/05-01, 2005. 1~81
- Y. Tang, J. Wang, X. Wang *et al.*. KTN based electro-optic beam scanner [C]. *SPIE*, 2008, **7135**:713538
- D. A. Scrymgeour, L. Tian, V. Gopalan *et al.*. Phased-array electro-optic steering of large aperture laser beams using ferroelectrics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(21):211113
- L. Sjöqvist, E. Hällstig, J. Öhgren *et al.*. Retrocommunication — final report [R]. Swedish Defence Research Agency, FOI. FOI-R-1220-SE, 2004. 1~25
- M. Jarrahi, R. F. W. Pease, D. A. B. Miller *et al.*. Optical switching based on high-speed phased array optical beam steering [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(1):014106
- O. M. Efimov, L. B. Glebov, V. I. Smirnov. High-frequency Bragg gratings in a photothermorefractive glass [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(23):1693~1695
- H. S. Kenyon. System moves light with electrons, not gears. 2006, http://www.afcea.org/signal/articles/templates/SIGNAL_Article_Template.asp?articleid=1130&zoneid=182
- N. Fairfax. Steered Agile Beams (STAB). Commerce Business Daily, 1999, PSA # 2342: [http://www.fbodaily.com/cbd/archive/1999/05\(May\)/10-May-1999/Asol007.htm](http://www.fbodaily.com/cbd/archive/1999/05(May)/10-May-1999/Asol007.htm)
- U. Efron, B. Apter, E. Bahat-Treidel. Studies of fringing field effects in liquid crystal beam-steering devices [C]. *SPIE*, 2005, **5936**:59360P
- Wang Li, Shi Shunxiang, Li Jiali. Research on optical waveguide scanning technique based on GaAs/AlGaAs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(1):37~39
- 王莉,石顺祥,李家立. 基于 GaAs/AlGaAs 光波导扫描技术的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(1):37~39
- Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. 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. 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
- Shi Shunxiang, Li Jiali, Wang Guangsheng *et al.*. A novel optical waveguide array electro-optic fast scanner [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **22**(11):1318~1322
- 石顺祥,李家立,王广生. 一种新型的光波导阵列电光快速扫描器 [J]. *光子学报*, 2002, **22**(11):1318~1322
- Zhu Chengyu. Study on the technology of spatial light modulation by electrical addressing [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of Chinese Academy of Sciences, 2002
- 朱成禹. 电寻址空间光调制技术的研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002
- Cui Rongliang. Study on a novel kind of optical beam scanning technology [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics of Chinese Academy of Sciences, 2002
- 崔荣亮. 一种新型的电光式扫描系统的设计研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002
- Lü Xiupin, Feng Kecheng, Liu Weiqi. Theoretical study on the optical phased-array scanning [J]. *J. Changchun University of Science and Technology*, 2002, **25**(12):47~49
- 吕秀品,冯克成,刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究 [J]. *长春理工大学学报*, 2002, **25**(2):47~49
- Lü Xiupin, Feng Kecheng, Liu Weiqi. A design for laser television with optical phased array scanning [J]. *J. Shantou University (Natural Science)*, 2003, **18**(1):43~47
- 吕秀品,冯克成,刘伟奇. 光学相控阵扫描激光电视的设计 [J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 2003, **18**(1):43~47
- Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2):111~114
- 倪树新,李一飞. 军用激光雷达的发展趋势 [J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2):111~114
- Ni Shuxin. Review on development of the new imaging laser radar systems [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(Suppl.):732~735
- 倪树新. 新体制成像激光雷达发展评述 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(增刊):732~735
- Wang Li, Lu Yaxiong, Huang Ziqiang *et al.*. Influence of marginal effect of electric field on properties of liquid crystal grating [J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2007,

- 22(1):61~64
王 俐, 卢亚雄, 黄子强 等. 电场边缘效应对液晶光栅特性的影响[J]. 液晶与显示, 2007, **22**(1):61~64
- 35 Wang Li, Zhang Cheng. Simulation of a liquid crystal diffraction grating [J]. *Photon Technology*, 2006, **1**:22~26
王 丽, 张 成. 液晶衍射光栅模型研究[J]. 光子技术, 2006, **1**:22~26
- 36 Li Huawei. A kind of blazed gratings for beam scanning [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007
李华伟. 一种可实现扫描的液晶闪耀光栅[D]. 成都: 电子科技大学, 2007
- 37 Liang Hongqiu. Study on the electric performance, optical performance for the PLZT thin film and the principle of electro-optic devices [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007
梁鸿秋. PLZT 薄膜电学和光学性能及电光器件原理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007
- 38 Feng Xiao, Weiwei Hu, A. Xu. Optical phased-array beam steering controlled by wavelength [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(26):5429~5433
- 39 J. Yu, J. Tang, Y. Peng. An efficient approach for adaptive multibeam forming algorithm [C]. *SPIE*, 2007, **6795**:679507
- 40 Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren *et al.*. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1861~1867
瞿荣辉, 叶 青, 董作人 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, **35**(12):1861~1867
- 41 L. Xu, J. Zhang, L.-Y. Wu. Numerical modeling for liquid crystal optical phased array and its phase delay characteristic [C]. *SPIE*, 2006, **6352** II:635225
- 42 H. Zhang, J. Zhang, L. Wu. Evaluation of phase-only liquid crystal spatial light modulator for phase modulation performance using a Twyman-Green interferometer [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(6):1724~1728
- 43 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9):1360~1364
张洪鑫, 张 健, 吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(9):1360~1364
- 44 L. Xu, L.-Y. Wu, J. Zhang *et al.*. Effect of phase valley on diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array [C]. *SPIE*, 2008, **7133**:71333L
- 45 Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying *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的研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(8):1497~1502
- 46 L. Xu, J. Zhang, L. Y. Wu. Influence of phase delay profile on diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array [J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, **41**(4):509~516
- 47 Liu Bohan, Zhang Jian. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):899~902
刘伯哈, 张 健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. 中国激光, 2006, **33**(7):899~902
- 48 Liu Bohan, Wu Liying, Zhang Jian. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):219~224
刘伯哈, 吴丽莹, 张 健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(2):219~224
- 49 L. Wu, J. Zhang, B. Liu. Arbitrary expected fringe producing by employing phase-only liquid crystal spatial light modulator [C]. *SPIE*, 2007, **6711**:67110J
- 50 J. Zhang, L. Wu, X. Liu *et al.*. Wave front transformation and correction by using SLM [C]. *SPIE*, 2007, **6711**:67110C
- 51 Xu Lin. Research on phase delay and diffraction efficiency of liquid crystal optical phased array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
徐 林. 液晶光学相控阵相位延迟及衍射效率研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008
- 52 Y. Fang, L. Wu, J. Zhang. Excitation of plane waves for FDTD analysis of anisotropic layered media [J]. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2009, **8**:414~417
- 53 R. N. McRuer, L. R. McAdams, J. W. Goodman. Ferroelectric liquid-crystal digital scanner [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23):1415~1417
- 54 C. M. Titus, P. J. Bos, O. D. Lavrentovich. Efficient, accurate liquid crystal digital light deflector [C]. *SPIE*, 1999, **3633**:244~253
- 55 O. Pishnyak, L. Kreminska, O. D. Lavrentovich. Digital beam steering device based on decoupled birefringent prism deflector and polarization rotator [R]. NASA/TM-2004-213197, 2004
- 56 J. Shi. Liquid crystal based beam steering [D]. Kent: Kent State University, 2005
- 57 J. Kim, C. Oh, M. J. Escuti *et al.*. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings [C]. *SPIE*, 2008, **7093**:709302
- 58 C. Oh, M. J. Escuti. Time-domain analysis of periodic anisotropic media at oblique incidence; an efficient FDTD implementation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24):11870~11884
- 59 N. A. Riza, S. A. Khan. Programmable high-speed polarization multiplexed optical scanner [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(7):561~563
- 60 S. A. Khan, N. A. Riza. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5):868~882
- 61 L. Shi, P. F. McManamon, P. J. Bos. Liquid crystal optical phase plate with a variable in-plane gradient [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(3):033109
- 62 G. F. Barrick, P. J. Bos, C. E. Titus *et al.*. Computing the liquid crystal director field in optical phased arrays [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(4):924~932
- 63 E. E. Kriezis, S. J. Elston. Light wave propagation in liquid crystal displays by the 2-D finite-difference time-domain method [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **177**:69~77
- 64 L. Vicari. Optical Applications of Liquid Crystals [M]. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003
- 65 I. Dierking. Textures of Liquid Crystals [M]. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003
- 66 A. G. Georgiou, M. Komarcevic, T. D. Wilkinson *et al.*. Hologram optimisation using liquid crystal modelling [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **434**:183/[511]~198/[526]
- 67 S. Wu. High birefringence liquid crystals for laser beam steering [R]. ADB273195, 2001. 1~8
- 68 S. Gauza, C. H. Wen, S. T. Wu *et al.*. High birefringence liquid crystals for photonic applications [C]. *SPIE*, 2005, **5947**:594706
- 69 C. H. Wen. High birefringence and low viscosity liquid crystals [D]. Orlando: University of Central Florida, 2006
- 70 S. Wu. High birefringence liquid crystals for laser hardening and IR countermeasure [R]. UCF-6501-6057, 2004. 10p
- 71 J. L. West, G. Zhang, A. Glushchenko *et al.*. Fast birefringent mode stressed liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(3):031111
- 72 B. Wang, G. Zhang, A. Glushchenko *et al.*. Stressed liquid-crystal optical phased array for fast tip-tilt wavefront correction

- [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(36):7754~7759
- 73 Y.-H. Wu. Fast response liquid crystal devices [D]. Orlando: University of Central Florida, 2006
- 74 D.-F. Gu, B. Winker, D. Taber *et al.*. Dual frequency liquid crystal devices for infrared electro-optical applications [C]. *SPIE*, 2002, **4799**:37~47
- 75 D. Gu, B. Winker, B. Wen. Wavefront control with a spatial light modulator containing dual-frequency liquid crystal [C]. *SPIE*, 2004, **5553**:68~82
- 76 P. F. McManamon, E. A. Watson. Nonmechanical beam steering for passive sensors [C]. *SPIE*, 2001, **4369**:140~148
- 77 Y.-H. Lin, H. Ren, Y.-H. Wu *et al.*. Polarization-independent liquid crystal phase modulator using a thin polymer-separated double-layered structure [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22):8746~8752
- 78 Y.-H. Lin. Polarization-independent liquid crystal device [D]. Orlando: University of Central Florida, 2006
- 79 H. Ren, Y.-H. Lin, S.-T. Wu. Polarization-independent and fast-response phase modulators using double-layered liquid crystal gels [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(6):061123
- 80 P. F. McManamon, W. Thompson. Phased array of phased arrays (PAPA) laser systems architecture [J]. *Fiber Integrated Opt.*, 2003, **22**(2):79~88
- 81 T. A. Dorschner. Adaptive photonic phased locked elements [R]. DARPA/MTO Symposium, 2007

《中国激光》“新型光纤传感器件及网络技术”专题 征 稿 启 事

光纤传感是光传感领域的重大技术革命,光纤传感以其独特的优越性,已成为现代传感技术发展的主流方向。光纤传感是一门发展十分迅速的新兴技术科学,所提出的新原理、新方法和新技术已取得了诸多辉煌的成就。同时,伴随着网络技术的发展,光纤传感对现代光传感技术的发展产生了不可估量的作用。《中国激光》计划于2010年6月正刊(EI核心收录)上推出“新型光纤传感器件及网络技术”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“新型光纤传感器件及网络技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤传感及网络技术:如基于光纤及光纤光栅的化学、生物、环境、物理、机械等传感器件、传感系统及传感网络技术等;
- 新型光纤传感及技术:如光纤干涉及偏振传感技术、光子晶体光纤传感技术、微光纤传感技术等;
- 分布式光纤传感技术:如以拉曼散射、布里渊散射等为基础的光纤传感技术;
- 光纤智能结构和材料:包括结构设计、诊断方法、制作工艺、典型应用等;
- 用于光纤传感的无源及有源器件:如光源、探测器等;
- 其他

特邀组稿专家:

徐安士 教授 北京大学

张伟刚 教授 南开大学

截稿日期:2010年3月20日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“新型光纤传感器件及网络技术”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部