

文章编号: 1001-3806(2011)03-0293-06

基于液晶材料的光束偏转技术研究进展

邹永超, 司磊*, 陶汝茂, 周朴, 马浩统
(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 基于液晶材料的光束偏转系统具有高精度、低功耗、系统轻便、可随机指向等优点。介绍了该技术国内外研究动态;详细阐述了基于液晶材料光束偏转系统的基本原理、性能指标、研究进展及发展瓶颈;介绍了液晶材料与大角度步进器件组合使用实现大视场角光束偏转的几种新技术;综合比较评价了各种液晶光束偏转技术发展前景;对新型液晶光束偏转技术发展方向作了展望。

关键词: 光学器件;光束偏转;液晶;光学相控阵

中图分类号: O753+.2 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.002

Research progress of liquid crystal based light beam steering technique

ZOU Yong-chao, SI Lei, TAO Ru-mao, ZHOU Pu, MA Hao-tong

(College of Optoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Liquid crystal based beam steering technology has advantages of high accuracy, low power consumption and random-access pointing etc. Firstly, the worldwide research status was introduced. Secondly, the basic principle and performance indexes, in company with the research progress and bottleneck, of beam steering system based on liquid crystal were described in detail. Combining liquid crystal material with wide-angle step-steering devices, a few techniques for wide-angle beam steering were compared. Finally, the development trend of novel liquid crystal based beam steering technology was previewed.

Key words: optical devices; light beam steering; liquid crystal; optical phased array

引言^[1-6]

光束偏转技术广泛应用于各个领域,在激光雷达、激光通信、目标探测等方面都起着不可或缺的作用。传统的光束偏转系统依靠机械装置(如万向节等)改变光轴方向来实现光束偏转,其结构复杂、精度低、质量大、能耗高,在运动过程中还需要克服惯性的影响,性能受到很大的制约。与之相比,新型光束偏转技术不再依赖于光轴方向的改变,而是通过波前相位控制来实现光束方向的纯电控制,具有轻便、灵活、高精度、低功耗、可随机指向等优点。但是,由于受到工艺水平、材料特性、物理极限等因素的限制,某一项独立的技术很难兼顾偏转范围、偏转效率、分辨率以及响应时间等指标来完全满足现代光电系统应用的需要,在此驱动下,本领域不断涌现出各种新型技术和研究成果。目前,新型光束偏转技术主要有:传统的小角度偏转液晶型光学相控阵、基于液晶材料的大角度偏转系统、基于微机电系统的微镜阵列、电湿法等。本文中主要讨

论基于液晶(liquid crystal, LC)材料的光束偏转技术,包括以下几方面的内容:(1)概述国内外在光束偏转领域的研究动态;(2)综合评述液晶型光束偏转技术的发展现状,着重分析与实际应用相关的几个重要参量——最大偏转角、偏转效率、响应时间、光谱范围、分辨率(光束展宽);(3)综合比较各液晶型光束偏转技术,对其发展方向做出展望。

1 国内外研究动态^[2-3]

由于新型光束偏转技术更能适应目前高集成度、多任务化光电系统的需求,全球范围内都开展了对该技术的研究和探索。欧洲防务局建立了先进激光光束控制技术项目,集合了泰利斯、伽利略航空公司和Diehl BGT防务公司等单位,主要进行电光陶瓷、空间光调制器、离心微棱镜阵列等在光束偏转、整形和波前校正方面的应用研究。美国国防部高级研究计划局建立了敏捷光束控制研究项目,集合了多家国防科研机构和公司,如雷神公司、BAE系统公司、休斯研究室、罗克韦尔科技公司、肯特大学、加州大学洛杉矶分校、加州大学圣地亚哥分校、美国南加州大学等,进行芯片级全电控光束控制在军事应用方面的研究,重点关注光学微机电系统、衍射和微元光学、LC和光

作者简介:邹永超(1987-),男,硕士研究生,主要从事激光光束控制方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: w_zt@163.com

收稿日期:2010-11-18;收到修改稿日期:2010-11-26

子晶体等在空间通信及光电对抗系统中的应用,已经取得了显著成果。国内不少科研机构也开始了对新型光束偏转技术的研究。哈尔滨工业大学张健等人在光束控制、液晶光学相控阵(liquid crystal optical phased array, LCOPA)方面进行了深入研究并取得了较大进展。西安电子科技大学石顺祥等人进行了波导阵列在光束偏转领域应用的研究,取得了一定进展。另外,电子科技大学、中国科学院上海精密机械研究所等机构也都开展了这方面的研究。总的来说,国内新型光束偏转技术研究主要集中在 LCOPA 方面,起步较晚,与国际水平有一定差距。

2 基于液晶材料的光束偏转技术

液晶材料存在良好的电控双折射效应和较大的双折射率,同时,其驱动耗能低,制备技术比较成熟,很早就被应用于光束偏转领域^[1]。

2.1 液晶型光学相控阵

如图 1a 所示,光学相控阵(optical phased array,

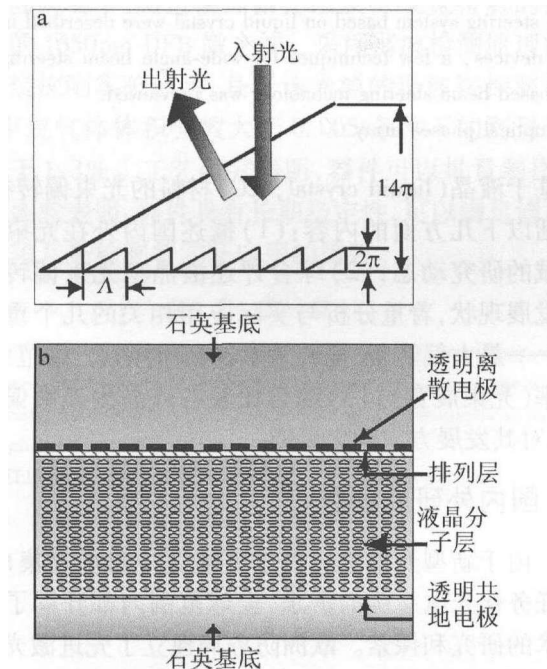


图 1 液晶光学相控阵原理图

a—相位分布示意图 b—液晶光学相控阵结构图

OPA)通过在光束波前产生一个附加倾斜相位分布来实现光束的偏转。由于光波的正弦特性,相位加减 2π 不会改变其远场分布,故斜线型相位分布可通过加减 2π 的整数倍变为图 1a 所示的锯齿形相位分布,以减小所需的最大光程差^[1]。向列型 LCOPA 如图 1b 所示,通过控制 LC 层上离散透明电极(像素化)之间的电压,利用 LC 的电控双折射效应,可以实现对光束波前的相位调制,其详细工作原理见参考文献[1]。Raytheon 公司研究人员在 2007 年左右利用 LCOPA 实

现了 $\pm 120\text{mrad}$ 的光束扫描,误差仅为 $1.54\mu\text{rad}$ ^[7]。国内,哈尔滨工业大学 ZHANG 等人在 2008 年左右实现了最大角度 2.0014° 的连续光束偏转^[8]。

2.1.1 液晶光学相控阵研究进展 最大偏转角: LCOPA 光束偏转角满足 $\sin\theta = \lambda/(Nd)$ ^[1],其中, λ 为入射光波波长, d 为电极有效尺寸, N 为每个周期内的电极数 ($N \geq 3$, $N = 1$ 时无偏转, $N = 2$ 时出现两级对称主极大,偏转效率较低)。目前工艺水平很难将电极尺寸做到光波长量级以下,取 $N = 3$,以 $d = \lambda$ 估算,最大偏转角约为 19° 。另外,由于实际中不可避免的光学回程区^[1]会严重影响每个周期的有效尺寸,最大偏转角远小于理论计算值。有限的最大偏转角正是制约 LCOPA 走向实用的一个重要因素,下面介绍的多种技术正是为解决此问题而发展起来的。

(1) 偏转效率: LCOPA 偏转效率由 $\eta = \left[\frac{\sin(\pi/N)}{(\pi/N)} \right]^2 \times \left(1 - \frac{A_b}{A} \right)^2$ 决定^[1], N 为一个周期内电极数, A_b 为光学回程区大小, A 为每个周期的总尺寸。易知,偏转角增大,偏转效率将会明显降低,光学回程区的存在也严重影响偏转效率。实际应用中,电极几何结构造成的衍射效应也是影响偏转效率的一个重要因素。这些因素使得其偏转效率一般不超过 60%。近年来,研究人员针对此问题提出了多种新的技术和方案。2005 年左右,GRUNEISEN 等人首次提出了使用光电导介质代替离散透明电极的方法,控制照射光电导介质的光强分布,可以在光电导介质上产生类似离散电极的效果,此方法消除了离散电极衍射效应带来的效率损失,显著提高了偏转效率^[9]。2008 年左右,肯特州立大学的 SHI 等人首次利用 $\lambda/4$ 波片、半波片、 $\lambda/4$ 波片结构(quarter wave-plate, half wave-plate, quarter wave-plate, QHQ)基本原理实现了一种新的 OPA——垂直连续相位光学相控阵,利用控制液晶分子的排列方式实现类似 QHQ 中 β 角改变的效果,偏转效率达到 99.5%^[10]。2010 年,台湾 JAU 等人提出了一种新的方案,在胆甾型液晶材料中掺杂偶氮苯,在外电场作用下液晶分子周期排列形成类似布喇格光栅结构,利用偶氮苯的光异构化特性,当紫外光照射该结构时,光栅周期将发生变化,因此,可以控制入射光的衍射方向。利用该方法,实现了最大角约 19° 的连续光束偏转,其效率接近布喇格光栅理论衍射效率^[11]。另外,利用时域有限元差分法进行的关于电极非均匀排列、光学回程区对效率影响的研究也取得了一定进展^[12]。

(2) 响应时间: LCOPA 响应时间由 $\tau = \frac{l^2 \gamma}{\kappa \pi^2}$ 决

定^[1], t 为液晶层厚度, γ 和 κ 分别为液晶材料的黏性系数和弹性系数。传统 LCOPA 的响应时间为毫秒级, 该响应时间比目前微波雷达慢很多^[1]。减小液晶层厚度是减小响应时间的有效方法, 这也是将斜线型相位分布等效为锯齿形的原因, 但是液晶层厚度最小只能为等效光程 λ (反射式为 $\lambda/2$)。20 世纪 90 年代, SHARP 等人提出了铁电液晶光学相控阵, 该材料具有良好的时间响应特性, 2009 年左右, ENGSTROM 等人用该材料实现了响应时间为 $200\mu\text{s}$ 的 OPA^[13]。另外一种加快响应时间的方法是使用双频液晶材料, 利用双频电压分别控制液晶分子的偏转和初始化, 2006 年左右, 肯特州立大学的 PISHNYAK 等人利用此方法实现了约 0.5ms 的响应时间^[14]。

光谱范围、工作频宽及偏振依赖性: LCOPA 由于液晶材料自身特性的限制, 在可见光和近红外波段可以较好的工作 (约 $0.4\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$)^[3]。其物理实质可以认为是利用双折射效应实现的可控闪耀光栅, 这就决定其只对特定波长、特定偏振方向的线偏振光起作用。可以通过叠加长轴方向相互垂直液晶层的方法来消除其对偏振的依赖性, 但是这种方法需要更复杂的驱动电极, 并且衍射效率也会受到影响。工作频宽方面, 多波长输入输出 LCOPA 的研究也取得了一定进展^[15]。

(3) 分辨率: LCOPA 分辨率由 $\delta = C\lambda/D$ 决定^[1], C 为与入射光性质有关的常数, D 为 LCOPA 孔径尺寸, 假设入射光束为高斯光束, 则 $C = 1.03$, 目前 LCOPA 口径可以达到 4cm ^[5], 因此很容易估算出 LCOPA 精度为几十个微弧度, 如此高的分辨精度正是 LCOPA 的优点之一。

2.1.2 小结 LCOPA 作为可编程控制的衍射光学器件, 具有高分辨率、低电压驱动、轻便等优点, 同时有液晶显示、投影设备等市场需求的推动, 成本低廉。但是, 减小响应时间、提高制备技术减小电极尺寸、实现偏振无关以及拓展其工作谱宽都是亟待解决的工作, 其最大偏转角的限制也直接决定了其应用范围, 将 LCOPA 与大角度步进光学器件组合使用是一个很好的解决方案。

2.2 液晶微透镜阵列

电场边缘效应引起的存在于相位回置处的光学回程严重影响 LCOPA 的偏转效率, 液晶微透镜阵列 (liquid crystal microlens array, LCMLA) 由于不需要相位回置, 可以很好地解决此问题^[4]。其物理原理如图 2a 所示, 3 个透镜阵列如图排列, 第 3 层的前焦面与第 1 层的后焦面重合, 第 2 层透镜阵列缩束保证第 1 层的出

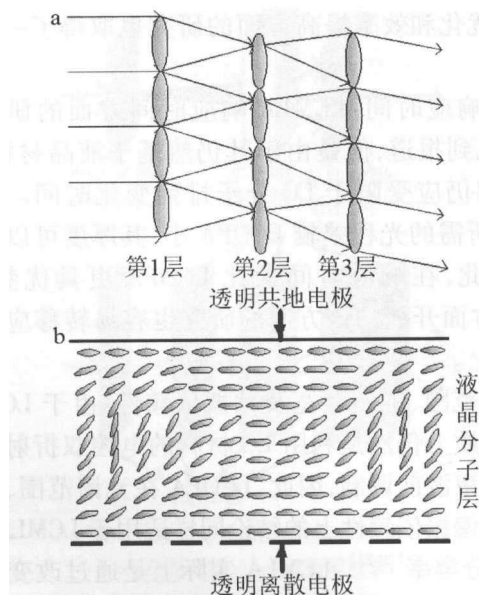


图2 液晶微透镜阵列原理图

a—透镜阵列光束偏转示意图 b—液晶型微透镜结构图

射光全部照射到第 3 层。经过简单的物理推导可以得到光束偏转角由 $\theta = \arctan(2\Delta x/f)$ 决定, Δx 为第 1 层和第 3 层透镜阵列在垂直于光轴方向错开的位移, f 为 3 个透镜阵列的共有焦距。控制 Δx 和 f 即可以实现对光束偏转角的控制。如图 2b 所示, 通过控制液晶层外离散电极的电压分布可以模拟出类透镜阵列, 微透镜阵列之间位置差和透镜焦距都可以实现电控制。2009 年, 美国空军实验室 McMANAMON 等人报道了用此方法实现最大偏转角为 25° 的实验研究^[4]。

2.2.1 微透镜阵列研究进展 (1) 最大偏转角: LCM-LA 最大偏转角由 Δx 和 f 决定, 实际应用中, Δx 不能超过透镜半径的一半, 否则渐晕将会带来严重影响, 结合目前工艺水平, 最大偏转角一般不超过 25° ^[3]。由于衍射级的限制, 微透镜阵列只能实现离散角度的偏转, 需要加入相位或角度精细调整器件以实现光束连续偏转。AKATAY 等人在 2006 年使用前置预扫描透镜的方法实现了光束准连续偏转^[16]; BOURDERIONNET 等人在 2008 年左右使用电光陶瓷阵列与 LCMLA 组合使用实现了 $\pm 12^\circ$ 的连续光束偏转^[17]。

(2) 偏转效率: LCMLA 的偏转效率主要受以下几个因素的影响: 多层结构增加了制备装配的复杂度, 由此带来的误差将会影响其效率^[4]; 各层微透镜阵列之间的位置偏差; 单个微透镜带来的波前相位误差; 微透镜的衍射损耗^[18]。肯特大学 SHI 和空军实验室 McMANAMON 等人在 2010 年发表了在获得高效率 LCM-LA 光束偏转方面的研究成果, 他们在理论上深入分析了影响 LCMLA 效率的因素, 在实验中采用微透镜阵列、相位补偿板等方法进行优化, 在偏转角 1° 左右时, 将效率由 84.2% 提高到 94.4% ^[19]。AKATAY 等人在

LCMLA 优化和效率提高方面的研究也取得了一定进展^[18]。

(3) 响应时间: LCMLA 响应时间方面的研究成果尚未见到报道,但是由于其仍然基于液晶材料,其响应时间仍应受限于 LC 分子排列变化时间。由于 LCMLA 所需的光程差较 LCOPA 小,其厚度可以做到更小,因此,在响应时间上比 LCOPA 更具优势,在 LCOPA 方面开展的该方向的研究也容易转移应用到 LCMLA 上。

光谱范围、工作频宽及偏振依赖性: 由于 LCMLA 在物理实质上仍然是利用 LC 材料的电控双折射效应来实现光束波前调制,因此,LCOPA 在光谱范围、工作频宽以及偏振依赖性上的结论同样适用于 LCMLA。

(4) 分辨率^[20-22]: LCMLA 实际上是通过改变出射光主极大的衍射级来实现光束偏转的,其分辨率仍然受限于 $\delta = C \lambda / D$, D 为其出射口径上最大相干长度。也就是说微透镜阵列之间的空间相干性决定着其分辨率。研究表明微透镜尺寸的均匀性严重影响阵列的空间相干性,要获得良好的分辨率,微透镜尺寸误差一般不能超过 3%。

2.2.2 小结 LCMLA 相比于 LCOPA 具有更大的偏转角,不受相位回置带来的光学回程区的影响,光束偏转效率更高。但是,由于其基于衍射级的改变来实现光束偏转,只能实现离散的角度偏转,实际应用中,要将其与精细角度偏转器件联合使用来实现光束的连续偏转,这大大增大了其制备复杂度。另外,由于其是多层结构,整个系统的尺寸将较 LCOPA 更长,多层结构也可能引起更大的效率损失。

2.3 液晶偏振光栅

无论是 LCOPA 还是 LCMLA 都是通过制造光程差来等效相位延迟以改变光束波前相位分布,最终实现光束偏转。同一介质中相同几何长度的光程差受波长的影响,这就决定了此两种方法只能实现窄带光波的偏转。液晶偏振光栅 (liquid crystal polarization gratings, LCPGs) 使用 QHQ 的基本原理,直接实现相位延迟控制,因此可以实现宽光谱工作^[23]。QHQ 基本结构如图 3a 所示,入射光束经过起偏器变为线偏光,经过 $\lambda/4$ 波片后变为圆偏振光,再经过半波片,然后再次通过 $\lambda/4$ 波片和检偏器出射。利用琼斯矩阵理论,该过程可以表示如下^[4]: 经过 $\lambda/4$ 波片后的圆偏振光

可以表示为 $E_{in} = \begin{bmatrix} E_{x,in} \\ E_{y,in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x,in} \\ iE_{x,in} \end{bmatrix}$, 设半波片慢轴与 x 轴夹角为 β , 半波片相位延迟 $\varphi = \pi$, 则经过半波片后的出射光由下式决定:

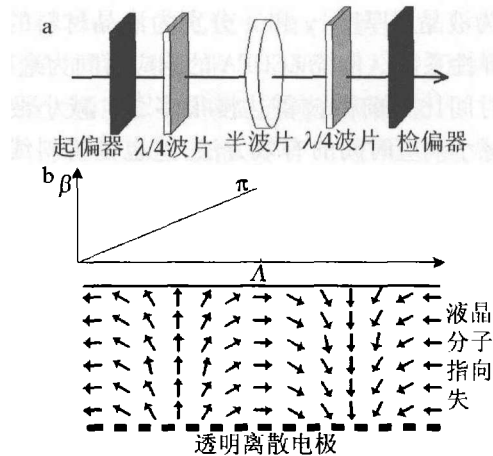


图3 液晶偏振光栅原理图

a—QHQ 基本结构 b—液晶偏振光栅结构图

$$E_{out} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 10 \\ 0e^{i\varphi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{x,in} \\ iE_{x,in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

化简(1)式可得 $E_{out} = \begin{bmatrix} E_{x,in} e^{i2\beta} \\ i E_{x,in} e^{i2\beta} \end{bmatrix}$, 出射光为含有相位

因子为 $e^{i2\beta}$ 的圆偏振光,出射光波前相位可以通过改变 β 的值实现连续控制。并且 β 只需 0 到 π 的变化就可以实现波前 0 到 2π 的相位精细变化控制。LCPGs 利用该原理,将半波片替换为液晶层,使得液晶层厚度为等效半波长光程差,利用控制液晶分子指向矢的方向即可以实现慢轴与 x 轴夹角的变化控制。LCOPA 如图 3b 所示,液晶慢轴与轴夹角可以实现电控制,因此,可以很好地替代图 3a 中的半波片。卡罗莱纳州立大学 OH 等人在这方面开展了深入的研究。

2.3.1 液晶偏振光栅研究进展 (1) 最大偏转角^[4, 24]: LCPGs 偏转角服从光栅方程 $\sin\theta_{in} \pm \sin\theta_m = m \times (\lambda/\Lambda)$, 其中 Λ 为光栅周期, m 为衍射级,研究表明对于 LCPGs, m 只能取 +1, 0, -1, 其最大偏转角由 Λ 决定。为实现高效率大角度偏转,一般是使用多级 LCPGs 串联的方法。为实现光束的连续偏转,在 LCPGs 前还需要加上一个小角度精确偏转装置(如 LCOPA)。在该方面的研究进展较快, KIM 等人在 2009 年左右先后实现了视场角为 52° , 62° , 80° 的准连续偏转^[24-26]。

(2) 偏转效率^[4, 26]: LCPGs 偏转效率主要受衍射损耗、菲涅耳损耗、材料吸收、散射这几个方面的影响。KIM 等人通过主动式 LCPGs^[26] 减少每一级光学器件数的方法大大提高了整个系统的偏转效率,在大角度偏转(视场角 52°)时,偏转效率达到了 80% 左右。

(3) 响应时间: LCPGs 响应时间的研究成果尚未见于报道。但是, 相比于 LCOPA, LCPGs 由于只需要产生半波长的光程差, 液晶层厚度更薄, 约为 LCOPA 的一半。又由于液晶层响应时间正比于厚度的平方, 故 LCPGs 响应时间理论上约为同类型 LCOPA 的 $1/4$, 很容易达到实用中需要的微秒量级。

(4) 光谱范围、工作频宽及偏振依赖性: LCPGs 工作光谱范围仍然是受限于 LC 材料。宽工作频宽是 LCPGs 的一大优势, LCOPA, LCMLA 等衍射光栅器件在宽光谱工作情况下, 衍射效率将会严重下降。通过相位补偿的方法, LCPGs 在中等宽度谱宽下, 可以实现较高效率的光束偏转。OH 和 ESCUTI 深入研究了该问题。他们进行了深入的理论计算和仿真分析, 最后通过实验展示了其结果, 在 $\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 34.3\%$ 谱宽下实现了高效率光束偏转^[23]。

(5) 分辨率: LCPGs 分辨率仍然受限于 $\delta = C \times \lambda/D$, 由于物理本质上的相似性, LCOPA 和 LCMLA 在该方面的研究成果应该同样适用于 LCPGs。

2.3.2 小结 LCPGs 相对于前两者具有诸多优势, 薄的液晶层厚度使得其响应时间更快, 同时也消除了相位回置带来的光学回程影响, 最大偏转角也达到了实用水平; 另一典型优势就是其可以实现宽光谱工作高效率, 这对于光学探测、成像等领域的应用有着重要意义。LCPGs 同 LCOPA 一样, 由于市场的推动, 可以实现低成本化量产。但是, 多层级联 LCPGs 对制备工艺、系统稳定性方面也提出了更高的要求。总的来说, LCPGs 在光束偏转领域是一个极具前景的方向。

2.4 液晶与大角度步进偏转器件组合使用

如前面所述, 传统 LCOPA 存在较多性能上的限制, 尤为突出的就是有限的最大偏转角和较大偏转角时的低偏转效率。将 LCOPA 与大角度离散偏转器件组合使用可以很好地解决此问题。

2.4.1 与体全息光栅组合使用 体布喇格光栅 (volume Bragg grating, VBG) 可以实现极高效率 (大于 99%) 的光束偏转^[27-29], 在光热折射 (photothermal refractive, PTR) 玻璃上可以使用光全息的方法刻蚀出需要的 VBG^[5]。将多个 VBG 复用在 PTR 玻璃上, 使得每个 VBG 具有不同的偏转角。如图 4a 所示, 前置 LCOPA 在较小角度范围内偏转, 实现对后续 VBG 的选址, 选择期望偏转角所对应的 VBG, 后置 LCOPA 起到角度精扫描的作用, 可以对 VBG 离散偏转角进行填充和细化。2007 年, 雷神公司的研究人员申请了该技术的专利, 声称实现了 $\pm 45^\circ$ 范围内的光束连续偏转^[6,30], 光束偏转效率为 15% ~ 20%^[6]。而该项技术

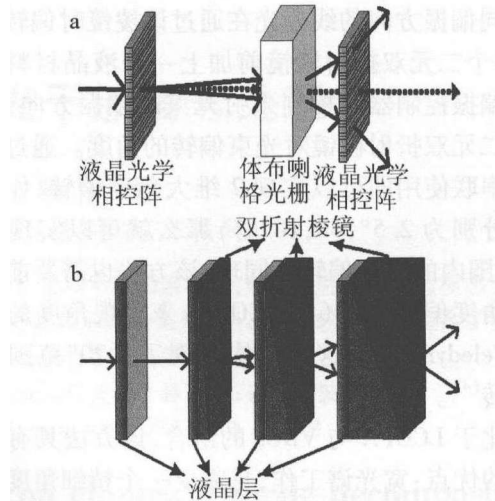


图4 液晶与大角度步进器件组合
a—全息光栅 b—双折射棱镜

进一步的研究成果尚未见于报道。

该项技术的最大偏转角理论上由刻蚀的 VBG 决定。根据需要可以刻蚀多路 VBG, 如每个 VBG 可以实现 5° 的光束角度偏转放大, 那么 9 个 VBG 复用在 PTR 玻璃中就可以实现最大 45° 角的偏转。但是, 由于目前工艺水平决定了每个 PTR 玻璃中可以复用的 VBG 数目, 通常需要多层 PTR 玻璃串联才能够实现足够多的离散偏转角范围^[4]。多层 PTR 玻璃的串联又会带来一个新的问题——光束偏离有效工作区, 当 VBGs 厚度非常大而有效孔径又较小时, 光束在大角度偏转很容易偏向 VBG 的侧沿, 造成严重的光损耗。由于 VBG 可以实现极高效率的光束偏转, 影响该系统偏转效率的因素理论上主要是 VBGs 前后的精细角度偏转器件 LCOPA, 但是, 当使用多层 PTR 玻璃串联时, 每层 PTR 玻璃所造成的吸收损耗、散射损耗等因素也将会对偏转效率产生明显影响。在工作谱宽、响应时间、偏振依赖性等问题上, 该系统仍然主要受限于系统中 LCOPA。

该项技术目前已经应用于主动式光相位锁定 (adaptive photonic phase locked elements, APPLE) 系统中^[7], 但是其偏转效率仍然非常低。提高工艺水平或者使用的新的材料提高单层 PTR 玻璃中可复用的 VBG 数目可以明显改善此问题。另外一个可能严重影响其性能的问题就是各层 VBG 之间的光束角度匹配问题。VBG 对入射光束的角度选择性极强, 不满足布喇格条件的入射光束衍射效率极低, 因此, 各层 VBG 之间角度匹配上的精度也将严重影响系统光束偏转效率。使用更高效率的精细角度偏转器件替代 LCOPA 将会大大提高系统的性能。

2.4.2 与双折射棱镜组合使用 如图 4b 所示, 晶轴方向相互垂直 (一个在纸面方向, 另一个垂直纸面方向) 的双折射晶体组成图中所示的二元双折射棱镜。

由于不同偏振方向的线偏光在通过该棱镜时偏转角不同,在每个二元双折射棱镜前加上一个液晶材料构成的电控偏振控制器件控制入射光束的偏振方向,则可以选择二元双折射棱镜对光束偏转的角度。通过多个单元的串联使用即可以实现2维大角度偏转,如各级偏转角分别为 $2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 等,那么就可以实现2维 $\pm 10^\circ$ 范围内的光束偏转。同理,该方法也需要前置一个精细角度偏转器件(如LCOPA)来实现角度的精细调整。Teledyne采用这种结构实现了 $\pm 20^\circ$ 范围内的光束偏转^[4]。

相比于LCOPA与VBGs的组合,该方法具有两个非常好的优点:宽光谱工作;只需要一个精细角度偏转器件^[4]。但是也面临两个严重的问题:大厚度棱镜易造成光束偏离有效工作区;串联棱镜使系统长而重,稳定性、精确性上的要求则更高。使用锯齿形相位光栅替代二元双折射棱镜可以很好的解决该问题^[4]。

3 总结与展望

传统的LCOPA具有轻便灵活的特点,可以实现小角度范围内的精细偏转,但是其在响应时间、偏转效率上的表现仍然有待提高。VBGs与LCOPA组合使用解决了最大偏转角过小的问题,但是,由于要使用两个LCOPA以及多级VBGs串联,光束偏转效率很低。使用其它更好的精细角度偏转技术替代LCOPA将会大大提高该系统的性能,另外,适当增多单层PTR玻璃中刻蚀的VBGs数目以减小串联级数也是提高效率的有效方法。LC层与二元双折射棱镜组合使用只需要一个LCOPA,减少了一个主要效率损耗器件,该系统还具有宽光谱特性的优点。其主要问题是怎么样解决过厚棱镜带来的光束偏离有效工作区以及多级串联带来的系统复杂性和不稳定性问题。LCMLA和LCPGs都避免了LCOPA中光学回程带来的影响,具有很高的偏转效率,但是两者都需要添加精细相位调整器件来实现光束的准连续偏转,都是使用多级串联来实现大角度偏转,系统的尺寸较大,稳定性较差。LCPGs具有偏转范围大、效率高、频谱宽的特点,但是其只能实现准连续光束偏转,且角度间隔较大,如何实现LCPGs无盲区偏转将是一个重要研究方向。另外,目前的光束偏转技术都集中在低功率系统工作下的研究,对于应用在高能激光系统下的光束偏转技术研究较少,高能激光对光束偏转系统的影响尚没有公开的研究报道,加强对高能激光下光束偏转系统的特性研究将大为拓展该技术的应用范围。

参 考 文 献

[1] McMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* Opti-

- cal phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2):268-298.
- [2] ZHANG J, FANG Y, WU L Y. Liquid crystal beam steering technologies[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 326-334 (in Chinese).
- [3] THOLL D H. Novel laser beam steering techniques[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6397:639708/1-639708/14.
- [4] McMANAMON P F, BOS P J, ESCUTI M J, *et al.* A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. Proceedings of IEEE, 2009, 97(6):1078-1096.
- [5] McMANAMON P F. Agile nonmechanical beam steering[J]. Optical and Photonics News, 2006, 17(3):24-29.
- [6] McMANAMON P F. An overview of optical phased array technology and status [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5947: 594701/1-594701/10.
- [7] ZHOU P, XU X J, LIU Z J. New technology and new configuration for high energy laser system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(1):1-6(in Chinese).
- [8] ZHANG J, XU L, WU L Y. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. Acta Photonic Sinica, 2008, 37(8): 1497-1502(in Chinese).
- [9] GRUNEISEN M T. Programmable diffractive optics for wide-dynamic-range wavefront control using liquid-crystal spatial light modulators [J]. Optical Engineering, 2004, 43(6):1387-1393.
- [10] SHI L, MCMANAMON P F, BOS P J. Liquid crystal optical phase plate with a variable in-plane gradient[J]. Applied Physics, 2008, 104(3): 033109-033112.
- [11] JAU H C, LIN T H, FUNG R X, *et al.* Optically-tunable beam steering grating based on azobenzene doped cholesteric liquid crystal [J]. Optics Express, 2010, 18(16):17498-17503.
- [12] XU L, HUANG Z Q. Quantitative analysis on flyback region problem of 1-D transmissive liquid crystal optical phased array devices [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7658:76580N/1-76580N/6.
- [13] ENGSTROM D, O'CALLAGHAN M J, WALKER C, *et al.* Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array [J]. Applied Optics, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [14] PISHNYAK O. Smectic-a-filled birefringent elements and fast switching twisted dual-frequency nematic cells used for digital light deflection[J]. Optical Engineering, 2006, 45(4):0440021-0440029.
- [15] SHARMA N, ZMUDA H. MIMO based optical phased array technology with electronic beam steering for laser radar applications [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7700:77000E/1-77000E/5.
- [16] AKATAY A, ATAMAN C, UREY H. High-resolution beam steering using microlens arrays[J]. Optics Letters, 2006, 31(19): 2861-2863.
- [17] BOURDERIONNET J, RUNGENHAGEN M, DOLFI D, *et al.* Continuous laser beam steering with micro-optical arrays-experimental results[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7113:71130Z/1-71130Z/11.
- [18] AKATAY A, UREY H. Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system [J]. Optics Express, 2007, 15(8): 4523-4528.
- [19] SHI L, SHI J R, McMANAMON P F. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light [J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 409-421.
- [20] LIN Y H, MAHAJAN M, TABER D, *et al.* Compact 4 cm aperture transmissive liquid crystal optical phased array for free-space optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5892:55920c/1-55920c/10.

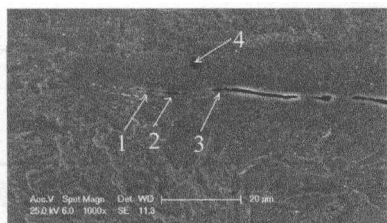


Fig. 4 SEM in crack zone

结合图3和图4,发现焊缝区裂纹沿晶界开裂,焊缝裂纹区的磷含量高于晶内的磷含量。不同区域磷含量参见表4。这主要是焊缝区内的金属受高能束激光

Table 4 P in different zone

number	w(P) (mass fraction)
1	0.0073
2	0.0040
3	0.0033
4	0.0029

加热快速熔化后,然后以极快的速度冷却,熔池中的金属快速凝固,焊缝中的磷元素来不及扩散,在晶界上形成偏析。磷在晶界上的偏析降低了晶粒之间的结合力,同时磷与铁结合形成的 Fe_3P ,本身既硬又脆,导致焊接接头的韧性降低,在焊缝区形成裂纹。

3 结论

(1)在特定焊接工艺参量下,采用激光焊焊接含磷高强钢M250P1得到的焊接接头强度和成型性能均超过母材,但焊接接头韧性不够,容易导致生产过程中钢带在焊缝区发生开裂;(2)从显微组织上分析,焊缝内存在显微裂纹是导致焊接接头开裂的主要原因;(3)焊缝区内的显微裂纹沿晶界开裂,主要是焊缝区内金属快速冷却过程中,磷元素来不及扩散,晶界发生偏析,使焊接接头韧性不够,引起钢卷在焊缝区发生断带。

(上接第298页)

- [21] GLCKNER S, GRING R. Investigation of statistical variations between lenslets of micro-lens arrays[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(19):4438-4445.
- [22] WATSON E A, WHITAKER W E, BREWER C D, *et al.* Implementing optical phased array beam steering with cascaded micro-lens arrays[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 3: 1429-1436.
- [23] OH C, ESCUTI M J. Achromatic polarization gratings as highly efficient thin-film polarizing beam splitters for broadband light[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6682:668211/1-668211/12.
- [24] KIM J, OH C, ESCUTI M J, *et al.* Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7093:709302/1-709302/12.
- [25] OH C, KIM J, MUTH J M, *et al.* A new beam steering concept: Risley gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7466:74660J/1-74660J/8.
- [26] KIM J, MISKIEWICZ M N, SERATI S. High efficiency quasi-ternary design for nonmechanical beam-steering utilizing polarization gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7816: 78160G/1-78160G/11.
- [27] GLEBOV L. Fluorinated silicate glass for conventional and holographic optical elements[C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6545:654707/1-654707/10.
- [28] VOROBIEV N, GLEBOV L, SMIRNOV V. Single-frequency-mode Q-switched Nd:YAG and Er: glass lasers controlled by volume Bragg gratings[J]. *Optical Express*, 2006, 16(12): 9199-9204.
- [29] CIAPURIN I V, GLEBOV L B, SMIRNOV V I. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings PTR glass[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5742:57420/1 ~ 57420/6.
- [30] SMITH I W, HOLZ M K O. Wide angle beam steering system; US, 7215472[P]. 2008-09-23.

参考文献

- [1] YOUHO Ch, YOUNG M H, HEON Y K, *et al.* Investigations of weld-line movements for the deep drawing process of tailor welded blanks[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 10(8):1-7.
- [2] CHAN L C, CHENG C H. Damage-based formability analysis for TWBs[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2005, 1(14):83-95.
- [3] HISASHI K, TOSHIYUKI T, FUMIAKI CHEN G Y. Formability of tailored blanks[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 7(1):134-140.
- [4] WU Q, XU L Y, CHEN G Y, *et al.* Experimental study about CO₂ laser welding of galvanized sheet[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6):571-574(in Chinese).
- [5] MA M T. *Advanced vehicle steel*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:1-3(in Chinese).
- [6] WANG L. A review and prospect of the IF steels in baosteel[J]. *Microalloying Application in Baosteel*, 2002, 6(3):51-58(in Chinese).
- [7] LIU G H, LIU J L, LIU H, *et al.* YAG pulsed laser welding for AZ91 magnesium alloy[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4):459-462(in Chinese).
- [8] LIU J H, HU L J, XIONG J G, *et al.* Laser butt welding of steel sheet used in automobile[J]. *China Mechanical Engineering*, 1996, 7(4):96-99(in Chinese).
- [9] LI Y L, HUANG J, GAO Zh G, *et al.* Structure and properties of high power laser welding of high strength steel B450LAD for vehicles[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12):2047-2051(in Chinese).
- [10] GENG P, YANG Y L, ZHANG D. Low power Nd:YAG laser welding of 18-8 type austenitic stainless steel[J]. *Laser & infrared*, 2007, 37(1): 34-36(in Chinese).
- [11] LIU K, LIU J H, ZHOU Ch. Control of laser induced plasma during laser penetration welding[J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36(23):86-88(in Chinese).
- [12] CHEN LI, HU X Y, HU L Y. Characteristics on laser beam welded high strength steel[J]. *New Technology & New Process*, 2002, 11(1):26-28(in Chinese).