

文章编号:1007-2780(2013)02-0199-05

动态掩膜光刻在液晶取向中的应用

胡华超,魏冰妍,胡伟*,陆延青

(南京大学 现代工程与应用科学学院,江苏 南京 210093)

摘 要: 利用基于数控微镜阵芯片的微投影光刻系统将任意设定的图形投影到 SD1 取向涂层上,约束 SD1 分子的排列方向,进而控制液晶的区域取向。该动态掩膜光刻系统可用于液晶取向的任意图形制备和偏振控制,实际分辨率达到了 5 μm 。基于 SD1 材料的可擦写特性,实现了不同一/二维码间的光控转换,并实现了任意灰度的分区控制。上述器件均可在外场作用下实现开关或调谐。该动态掩膜光刻技术可方便地实现实时、复杂的液晶图形取向控制,在信息显示与识别及可调光子学器件等方面有着广阔的应用前景。

关 键 词: DMD;液晶;光取向;二维码;灰度

中图分类号: O43; O753⁺.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 3788/YJYXS20132802. 0199

Applications of Dynamic Mask Based
Photolithography in Liquid Crystal Alignment

HU Hua-chao, WEI Bing-yan, HU Wei*, LU Yan-qing

(College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: A micro-lithography system based on digital micro-mirror device is utilized in liquid crystal (LC) alignments. The projected images on SD1 guide the SDI molecular orientations of the command layer, and further determine the directors of LC. Both complex pattern fabrication and arbitrary polarization control could be accomplished on this system with resolution up to 5 μm . Pattern transforming among different bar codes and subarea controlling of random gray scale have been demonstrated by means of the optical rewritability of SD1. These LC devices are switchable and tunable under applied fields. The dynamic LC photopatterning technique may be widely used in information display and identification, tunable photonic devices, etc.

Key words: DMD; liquid crystal; photoalignment; 2D barcode; gray scale

1 引 言

为了利用液晶独特的光学异向性或者说液晶的双折射特性,必须使液晶分子具有一定的排向。液晶取向技术就是为了达到这一目的而发展的技术。对液晶分子的取向控制是很多液晶器件实现

的基础,在很多液晶应用领域中扮演着举足轻重的角色^[1-4]。传统的液晶取向方式是以绒布在高分子薄膜上摩擦,借以产生微小的沟槽并使液晶沿着沟槽方向排列^[5]。这种方法非常简单、方便且经济有效,所以市场接受度很高。但是这种接触式的方法摩擦之后会产生静电并造成微小灰尘

收稿日期: 2013-01-15; 修订日期: 2013-01-26
基金项目: 教育部博士点专项科研基金(No. 20120091120020)
作者简介: 胡华超(1986—),男,河南沈丘人,硕士研究生,主要从事液晶光控取向技术方面的研究。
* 通信联系人, E-mail: huwei@nju. edu. cn

和物理损伤。为了解决这些问题,近年来已有不少非接触式取向方式被提出,比如斜向蒸镀氧化硅^[6]、离子束取向^[7]、光取向^[8]等。其中,光取向技术由于容易实现选区取向形成多畴,解决了液晶的广视角问题而引起广泛的关注。

2006 年,Presnyakov 等用双光束干涉的方法制备了周期为 15 μm 的液晶光栅。虽然干涉法比较简单,但其构筑的图形比较单一,无法实现非周期结构^[9]。之后,相继有研究小组利用掩模曝光的方法进行了类似的实验。Kapoustine 等人用一个振幅光栅作为掩膜曝光制备了周期为 86 μm 的一维光栅^[10]。与双光束曝光或者多光束曝光技术相比,掩模曝光技术可以得到更为丰富的图形^[11-12]。但是各种掩模的制作成本不菲,且无法实现实时控制。

为此,我们将新近开发的一套动态掩模光刻系统应用于液晶的光取向,成功实现了液晶取向的任意图形制备和偏振控制^[13]。在此,我们基于此项技术,进一步发掘了其光学实时调控和灰度控制方面的优势。利用取向层 SD1 材料的可擦写特性,实现了一/二维非周期(一/二维码),二维周期阵列(六角晶格)等结构的实时转换,还实现了任意灰度的随机分区控制。该系统比传统光刻省却了昂贵的掩模板,大大降低了图形制备成本,并简化了光刻流程,无需对准即可实现任意图形的高分辨率的液晶选区取向控制。这些研究结果对液晶光取向技术在显示和非显示领域的广阔应用有着非常重要的意义。

2 实 验

如图 1 所示。基于数控微镜阵芯片(Digital micro-mirror device, DMD)的微投影光刻系统包含光源、光束整形与传播、图像生成(DMD)、图像缩微、CCD 监控及精密平移台部分。具体来讲,使用高压汞灯结合 320~500 nm 的滤光片,经过液体光导管和准直透镜出射均匀准直的 UV 光束。光束经反射镜照射到 DMD 表面。集成于 MEMS 上的 1 024×768 个微型反射镜作为 DMD 的一个个像素单元(13.68 μm ×13.68 μm)。每个像素均可通过搭载的电极控制偏转角度,从而提供“开态”和“关态”。所有“开态”反射镜反射的光束共同组成所需的掩膜图形。带有图形信息的光束通过一个平场复消色差的缩微透镜组

(10×, NA = 0.3, WD = 34 mm)缩束并在曝光平面(焦平面)处成像。基于共轭光路的 CCD 实时监控优化了调焦精度和光刻系统的光机分辨率,光路系统实际能够制备的线宽可达 5 μm 。高精度平移台的使用使得该系统具备了在大面积液晶光控取向中实际应用的条件。

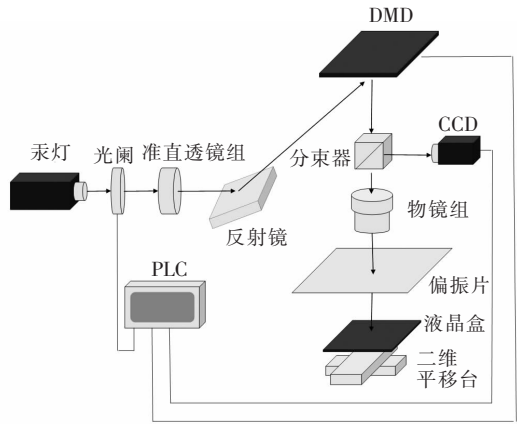


图 1 DMD 动态掩模光刻系统设计原理图
Fig. 1 Schematic of DMD lithography system

液晶样品制备选用 SD1 和 PI 作为光控取向材料。两片基板分别涂上 SD1 和 PI。其中 SD1 的分子结构式如图 2 所示,其分子含有两个偶氮结构(N=N),在吸收特定波长的光波后会发生光致异构化反应,由反式构象转变为顺式构象,伴随有分子的转动;结合材料吸收的二向色性,SD1 分子的长轴最终会大部分倾向于与入射光的偏振方向垂直排列。这种有序性能够通过分子间相互作用传递给液晶分子,进而发挥取向作用。而且随着分子再次吸收光子能量还可以重新发生顺式-反式构象转变,因此 SD1 具有良好的可擦写性^[14]。

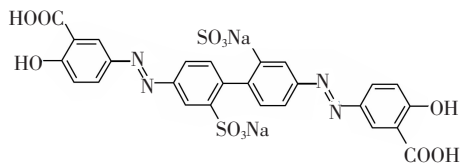


图 2 SD1 分子结构式
Fig. 2 Chemical structure of SD1

第一步,我们用蓝光 LED 透过偏振片(410 nm, 17 mW)正入射曝光涂有 SD1 的基板 5 min,使得 SD1 长轴方向(即诱导 LC 取向方向)与光的偏振方向相互垂直,同时,使用绒布摩擦涂有 PI 的基板以获得与 SD1 相同的取向方向。第二步,

将涂有 SD1 的基板放置在 DMD 光刻系统的焦平面上。设定曝光图形,并将其输出至 DMD 控制系统。DMD 选择反射的图形经过设定好的偏振片后以特定的偏振方向(与基片短边方向平行)照射样品,用相同的剂量进行曝光(5 J/cm^2)。由于 SD1 具有可擦写特性,曝光后 SD1 长轴方向将根据后一次曝光偏振方向被重置。这样,被光刻系统二次曝光的区域的取向方向将与原始取向(未曝光区域)相垂直。DMD 表面的图案就通过这种方式以特定比例(缩微物镜的缩放比例)被光取向涂层记录下来。最后,将两片基片做成液晶盒并灌注液晶分子。即可得到未二次曝光区域平行取向(PA),二次曝光区域 TN 取向的结构图形。控制 DMD 的动态图案进行曝光,就可得到任意选区分布的液晶取向。

3 结果与讨论

制备的图案具有良好的“复刻效果”,从影像效果看,畸变、球差、彗差等都能够得到非常好地控制。具体表现为暗区与亮区边缘锐利、无明显的锯齿结构。动态掩模曝光在光束扩散(light beam expansion)控制方面表现优秀,这就使得曝光的图形不会存在明显的变形,得到的大多数二维周期图形都不存在失真。

图 3(a)(b)分别是六角晶格设计图案以及液晶样品在偏振显微镜下的形貌。每一个晶格单元半径约为 $7\text{ }\mu\text{m}$ 。比对发现相较方形图案(棋盘结构)^[13]的“复刻”效果要好一些。这是由于圆形在二维图形中具有最高的对称性,液晶的连续性带来的影响在各个方向上基本上是均匀的,因而不会因旋转位移对图案形貌产生不良的影响。六角晶格及类似的晶体结构由于具备很好的对称性,可以用作光子带隙材料,又由于液晶具有优良的电光调谐特性,故可以实现可调光子晶体器件。

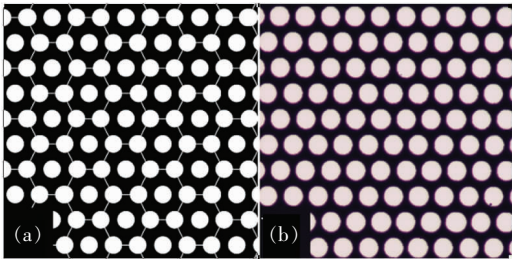


图 3 (a)六角晶格设计图;(b)六角晶格结构液晶样品图。
Fig. 3 (a) Pattern of hexagonal lattice by AI; (b) LC sample of hexagonal lattice.

二维液晶周期结构在光路多分复用技术中也有着重要的应用价值。此外,作为一个二维微型偏振阵列,其在偏振成像(polarization imaging)中也有着潜在的应用价值^[15]。

图 4(a)(b)是制备的一/二维码结构液晶样品重复擦写前后形貌图。一维码线宽分 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 两种,二维码曝光区域最小间隔约为 $5\text{ }\mu\text{m}$,表示信息为“南京大学”。工业和民用二维码一般是通过激光蚀刻、喷墨、机械打标或化学腐蚀等方式在物体表面直接打码^[16]。液晶选区取向技术提供了一种有别于直接打码的新型方法,首次在微尺度引入一/二维码概念并将液晶器件本身作为信息标记和识别载体,在微尺度结构的信息标记和识别方面具有潜在的应用价值。而且,制备的液晶样品其中一层基板涂有 SD1 取向层,其可重复擦写特性使得一/二维码可根据需要随时重新制作,即将“废弃回收”的二维码液晶样品重新在蓝光下整体垂直取向,使得 SD1 层恢复和 PI 层同样的取向,然后再在 DMD 焦平面上等光量曝光即可。这种特性使得液晶二维码具备了重复利用的优点;鉴于液晶器件可在外场作用下实现开关或调谐,因此也具备了实时、可控的信息显示与识别功能。值得一提的是,可擦写性能使得这种方法在工业应用上能够提高二维码产品良率,即瑕疵品只需重复擦写即可转为良品。

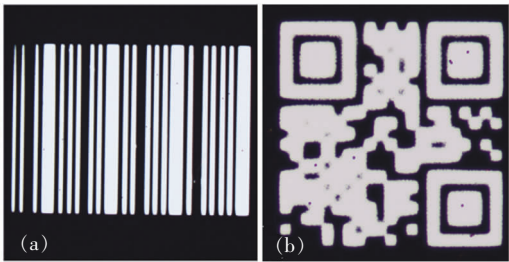


图 4 (a)擦写前一维码结构液晶样品图;(b)擦写后二维码结构液晶样品图。
Fig. 4 LC sample of barcode before rewriting (a) and after rewriting (b)

此外,我们还实现了液晶任意灰度的分区控制。有别于 90° TN/PA 区域交错排列的液晶取向,我们在光路中将偏振片置于可旋转台上,旋转偏振片控制角度进行曝光。曝光区域有规律排列或基于计算机伪随机码在整个液晶样品上划分为随机的子区域,从而在同一个液晶盒内实现了不

同区域的任意角度的取向设置,即实现液晶任意灰度的分区控制。这个分区过程没有液晶样品和光路位置的机械运动,所以位置精度很高。图 5 (a)展示了在偏光显微镜下观察到的圆形序列,偏振片间隔 $90/7$ 度旋转曝光。图 5 (b)是液晶盒随机分区曝光后的灰度图,方格边长 $15\ \mu\text{m}$,铺满了整个曝光区域。

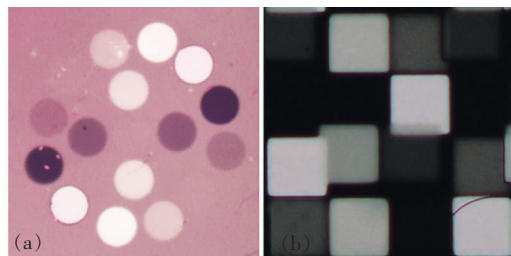


图 5 (a)圆形灰度序列液晶样品图;(b)方格随机灰度液晶样品图。

Fig. 5 (a) LC sample of circles with different gray scale; (b) LC sample of squares with random subareas generated by pseudo random code.

值得注意的是,如图 5(b)所示,这种不同扭转角度的子区域是可以利用计算机编程随机分布的,这种随机取向液晶波片可作为复杂结构液晶空间光调制器使用,是产生矢量光束的一种重要方法^[17]。

4 结 论

利用可实现液晶取向的任意图形和偏振控制的动态微投影光刻系统,制备了几种不同的周期及非周期结构,实际分辨率达到了 $5\ \mu\text{m}$ 。基于 SD1 材料的可擦写特性实现了一维/二维码的光控转换;利用计算机伪随机码产生动态掩膜,实现了任意灰度的随机分区控制。因为液晶可在外场下实现调谐,这些器件均具有优良的开关或调谐特性。该动态掩膜光刻技术可方便地实现实时、复杂的液晶图形取向控制,在信息显示与识别及可调光子学器件等方面有着广阔的应用前景,大大拓展了液晶取向在工业和科研上的应用。

参 考 文 献:

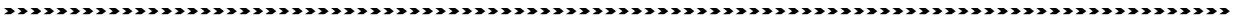
- [1] Gibbons W M, Sun S T. Optically generated liquid crystal gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 65(20):2542-2544.
- [2] 郭海成. 纳米结构液晶取向膜 [J]. *液晶与显示* 2012, 27(1):1-7.
- [3] 郭春桔, 夏森林, 孙振, 等. 侧链含稠环的新型聚酰亚胺液晶垂直取向剂的制备及表征 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(1):8-13.
- [4] 姜莹, 孙振, 房玉庆, 等. 聚酰亚胺液晶垂直取向膜的表面取向分析 [J]. *液晶与显示* 2011, 26(1):9-12.
- [5] Berreman D W. Solid surface shape and alignment of an adjacent nematic liquid-crystal [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1972, 28(26):1683-1686.
- [6] Janning J. Thin-film surface orientation for liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, 21(4):173-174.
- [7] Chaudhari P, Lacey J, Len S C, *et al.* Atomic beam alignment of liquid crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, 37(1A/B):L55-L56.
- [8] Ichimura K, Suzuki Y, Seki T, *et al.* Reversible change in alignment mode of nematic liquid-crystal regulated photochemically by command surfaces modified with an azobenzene monolayer [J]. *Langmuir*, 1988, 4(5):1214-1216.
- [9] Presnyakov V, Asatryan K, Galstian T, *et al.* Optical polarization grating induced liquid crystal micro-structure using azo-dye command layer [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(22):10558-10564.
- [10] Kapoustine V, Kazakevitch A, So V, *et al.* Simple method of formation of switchable liquid crystal gratings by introducing periodic photoalignment pattern into liquid crystal cell [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 266(1):1-5.
- [11] Hu W, Srivastava A, Xu F, *et al.* Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(5): 5384-5391.
- [12] Hu W, Srivastava A K, Lin X W, *et al.* Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(11):111116(1-4).
- [13] Wu H, Hu W, Hu H. C, *et al.* Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithography system [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(15):16687-16689.
- [14] Wu W Y, Fuh A Y G. Rewritable liquid crystal gratings fabricated using photoalignment effect in dye-doped poly

(vinyl alcohol) film [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2007, Part1,46(10A):6761-6766.

[15] Zhao X, Bermak A, Boussaid F, *et al.* High-resolution photoaligned liquid-crystal micropolarizer array for polarization imaging in visible spectrum [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(23):3619-3621.

[16] 盛秋康. 二维码解码技术的研究与应用 [D]. 南京:南京理工大学,2011.

[17] Fan F, Du T, Abhishek K. S, *et al.* Axially symmetric polarization converter made of patterned liquid crystal quarter wave plate [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(21): 23036-23043.



(上接 P193)

例:[12]西安电子科技大学. 光折变自适应光外差探测方法:中国,01128777. 2[P/OL]. 2002-03-06[2002-05-28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zljs/hyjs-yx-new.asp?recid=01128777.2&leixin=0>.

电子文献:[序号]主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标志]. 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期]. 获取和访问路径.

例:[13]PACS-L: the public-access computer systems forum[EB/OL]. Houston,Tex: University of Houston Libraries, 1989[1995-05-17]. <http://info.lib.edu/pacsl.html>.

例:[14]Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC [EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.

- 2. 文后参考文献应在正文中引用该文献处进行标注。
 - 3. 关于作者姓名,姓在前,名在后(拉丁文只用缩写);作者 3 人以下应全部列出,4 人以上仅列出前 3 人,其后加“等”(外文加“et al”)。
 - 4. 注意参考文献标注的标点符号、次序,并不得缺项。
 - 5. 参考文献著录不规范的有可能影响文章的录用。
- 注:文献类型和电子文献载体标志代码:

文献类型和标志代码

文献类型	标志代码	文献类型	标志代码
普通图书	M	报告	R
会议录	C	标准	S
汇编	G	专利	P
报纸	N	数据库	DB
期刊	J	计算机程序	CP
学位论文	D	电子公告	EB

电子文献载体和标志代码

载体类型	标志代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL