

液晶相息图用于光学检测*

曹召良^{1,2} 胡五生³ 胡立发¹ 刘永军^{1,2} 穆全全¹ 宣丽¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130033)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

(3 济源职业技术学院,济源 454650)

摘要 根据液晶的动态响应和位相调制特性,研究了一种利用液晶显示器进行光学检测的检测方法.实验中,把液晶显示器改造为纯位相的空间光调制器,并测定了它的位相调制特性.实验测得:改造后的液晶显示器可实现 1λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 的调制量.通过引入相息图的方法,实现了液晶空间光调制器的大位相调制量.并产生了调制量为 3.4λ 的球面波.最后,利用液晶显示器检测了凸透镜的前表面.检测结果发现,干涉条纹为平行直条纹且 PV 值为 0.32λ .

关键词 光学检测;液晶;相息图;位相调制;空间光调制器

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

文献[1~5]报道了利用计算全息来检测光学表面,其中绝大多数都用来检测非球面,主要是因为现代光学系统中大量使用非球面来提高系统的性能^[6].而在非球面加工过程中,非球面的检测至关重要.经典的检测方法是利用补偿器来对其进行检测.虽然它被广泛应用,但是它有着造价高和加工周期长的缺点.为此,有人采用计算全息图来检测非球面.

利用计算全息图检测光学表面,和传统的补偿器相比非常方便且价格便宜.但是,它需要制作在平面或曲面基底上,这是非常困难的.而且一幅全息图只能检测一种特定的光学表面.为此,本文介绍一种能够动态产生计算全息图的方法,它可以根据被检光学面的面形产生相应的计算全息图.

液晶作为一种新型的显示材料,早为人们所熟知.除了显示特性以外,其还有着好的动态特性和调制光波位相的特性^[7~11].由于其可以用于显示,因此它的动态特性非常好.本文正是基于液晶的位相调制特性和动态特性,来研究一种新的光学检测方法.和传统的计算全息相比,其可以动态地产生计算全息图,而且一个液晶显示器可以检测任意的光学面.

1 液晶的位相调制特性

1.1 理论分析

根据液晶连续弹性体理论,液晶分子的自由能可表示为^[12]

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

其中 K_{11}, K_{22}, K_{33} 分别是液晶分子的展曲弹性常量、扭曲弹性常量和弯曲弹性常量, \mathbf{n} 是液晶分子的指向矢, \mathbf{D}, \mathbf{E} 分别是电位移矢量和电场强度.

本文使用的液晶显示器为摩擦取向(强锚定)且液晶分子平行排列.在此情况下,液晶分子自由能公式可写为^[13]

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d (K_{11} \cos^2 \theta + K_{33} \sin^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 dz - \frac{1}{2\epsilon_0} \int_0^d \frac{D_z^2}{\epsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \epsilon_{\parallel} \sin^2 \theta} dz \quad (2)$$

式中 ϵ_0 是真空介电常量, $\epsilon_{\perp}, \epsilon_{\parallel}$ 分别是垂直和平行方向的介电常量, D_z 是 z 方向的电位移矢量, d 为液晶层厚度, θ 是液晶分子的倾角.

把式(2)的积分方程变成微分方程

$$\left(\frac{dz}{d\theta} \right)^2 = \frac{K_{11} (1 + K \sin^2 \theta)}{G - \frac{D_z^2}{\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + \beta \sin^2 \theta)}} \quad (3)$$

式中 $K = (K_{33} - K_{11})/K_{11}, \beta = (\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})/\epsilon_{\perp}, G = D_z^2 / [\epsilon_0 \epsilon_{\perp} (1 + r \sin^2 \theta_n)]$, θ_n 是液晶分子的最大倾角.结合液晶盒上下层边界条件解方程(3)就可以得到在一定电压下液晶分子倾角的分布.

由于液晶具有晶体的双折射特性,因此可根据晶体的折射率椭球公式得到液晶盒内非寻常光的折射率分布^[14]

$$n_e(\theta_z) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta_z + n_e^2 \sin^2 \theta_z)^{1/2}} \quad (4)$$

式中 θ_z 使液晶分子倾角, n_e 和 n_o 液晶的非寻常光和寻常光的折射率.进而可得到位相延迟为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(z)] - n_o] dz \quad (5)$$

*国家自然科学基金(60277033, 50473040, 19974046, 59973020)和吉林省科委基金(20020603)资助
Tel:0431-6176319 Email:caozlok@yahoo.com.cn
收稿日期:2005-09-08

由以上分析可看出,液晶分子在电场的作用下发生偏转,即不同的电场对应于不同的液晶分子倾角.而由式(4)知,液晶分子倾角的变化引起液晶的非寻常光折射率 n_e 的变化,进而引起光束在液晶中位相延迟的变化.因此,可以通过控制液晶显示器的电压来控制光的位相.

1.2 液晶显示器位相延迟特性测定

对现有的 VGA 液晶显示器进行了改造,去除了上下基板上的偏振片,洗去了基板上的彩膜,改变了摩擦方向使液晶平行排列,并更换了具有大 Δn 的液晶材料.这样,液晶显示器便成了纯位相空间光调制器.其具体参量为见表 1.

表 1 液晶显示器参量

参量	描述
模式	电控双折射(ECB)
有效面积	220 mm×160 mm
占空比	87%
分辨率	640×480
显示灰度级	64
盒厚	5 μm
像素尺寸	100 μm ×300 μm

对于液晶显示器来说,不同的灰度级对应于不同的电压.因此,我们可以通过控制灰度级来控制液晶显示器的电压.本实验利用法国 JOBIN YVON 公司光谱型椭圆偏振仪测量了液晶显示器的灰度级和位相延迟之间的关系(图 1).同时,还利用光功率计测量了透射光强随灰度级的变化关系(图 1).由图可以看出,位相延迟随灰度级的变化而变化,且总的延迟量超过 1λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$).但是,透射光强在灰度级变化的过程中基本保持不变.因此,其是一个纯位相空间光调制器.

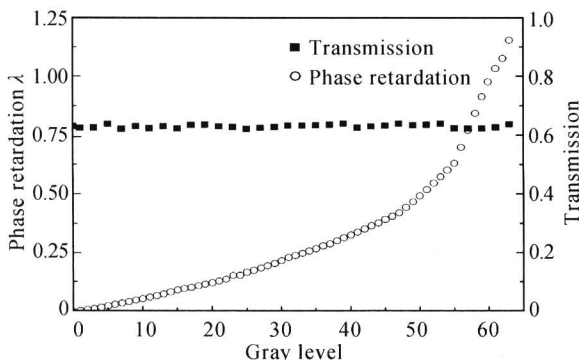


图 1 位相延迟和透过率随灰度级的变化关系
Fig. 1 Measured transmitted intensity and phase retardation at different grey levels.

2 液晶显示器的相息图实现

2.1 相息图及计算机模拟

光学检测中被检面和参考面的偏离量一般要远大于液晶显示器的位相调制量.为了解决这一问题,

本文采用计算全息中的相息图的方法来实现液晶显示器的大调制量.

对于计算全息,它的位相函数可以写为^[15]

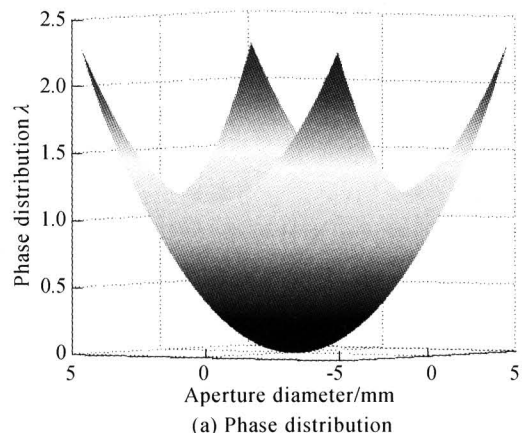
$$\varphi_{\text{CGH}} = \varphi_{\text{out}} - \varphi_{\text{in}} \quad (6)$$

式中 φ_{CGH} 是计算全息的位相函数, φ_{out} 和 φ_{in} 分别是出射波和入射波的位相函数.用于检测光学表面的计算全息的位相函数可写为

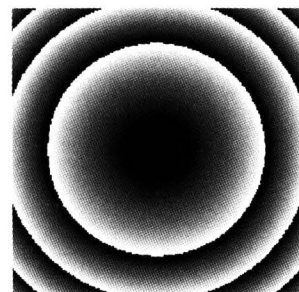
$$\varphi_{\text{CGH}} = \varphi_{\text{surf}} - \varphi_{\text{ref}} \quad (7)$$

式中 φ_{surf} 和 φ_{ref} 分别是被检面和参考面的位相函数.利用相息图的方法对 φ_{CGH} 进行处理,先以 2π 为单位取模,然后再对取模后的余数进行量化,便得到了最大变化量(调制量)为 2π 的位相分布.这样,便可以利用小的调制量来实现大的调制范围.

选取半径为 10 m、口径为 1 cm×1 cm 的球面作为被检元件,如果参考波为平面波,那么计算全息的位相分布 φ 便可根据 $\varphi_{\text{surf}} - \varphi_{\text{ref}}$ 计算得到(如图 2(a)).图 2(b)是经 2π 量化后的相息图的灰度分布图.其位相调制量为 3.64λ .



(a) Phase distribution



(b) Distribution of the grey level

图 2 相息图的计算机模拟结果

Fig. 2 The simulated results of the kinoform

2.2 相息图的实现

根据计算得到的位相分布,利用自编的软件进行数据读入并转换成相应的灰度加到液晶空间光调制器上.然后利用 ZYGO 干涉仪检测了其形成的球面波波面(图 3).检测得到其位相调制量为 3.4λ .和理论值 3.64λ 基本一致.这说明液晶空间光调制器确实能够实现大位相调制.

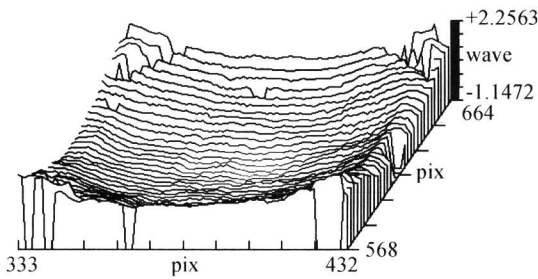


图3 利用相息图法产生的球面波波面
Fig. 3 The sphere wavefront produced by the kinoform method

3 光学检测实验

利用液晶空间光调制器来检测凸透镜的前表面. 其光路图如图4. 本实验中所用的透镜口径为50 mm, 晶体偏振片口径为30 mm, 起偏角为 56.5° . 由于本实验中的凸透镜的表面曲率半径非常大, 因此, 直接利用平面波对其进行检测.

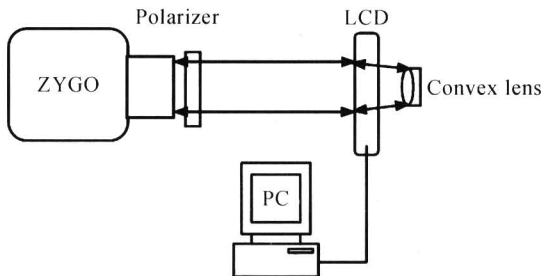


图4 检测透镜前表面的光路图
Fig. 4 The optical layout used to test the surface of the lens

实验中, 首先在没有放置液晶显示器的情况下检测透镜的表面. 图5是测得的透镜表面面形的干涉图. 由于受晶体偏振片尺寸的限制, 仅选取干涉图上的一个圆形区域进行检测, 其可利用 ZYGO 干涉仪上的 MASK 工具来实现. 图5干涉图中小圆即 MASK 区域. 实验中, 液晶显示器上的有效区域为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$. 此时, 把液晶显示器置于光路中并利用我们所编的控制软件找出液晶显示器上对应于圆 MASK 的区域, 在液晶显示器不加电的情况下, 测出所选区域的面形作为理想面形, 图6(a)是干涉图, 测得其 PV 值为 1.332λ . 然后从 ZYGO 干涉仪

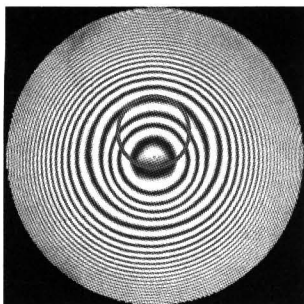


图5 透镜前表面干涉图及 MASK 区域
Fig. 5 The interferogram and the MASK area

中读出位相数据, 并运行液晶显示器控制软件, 进行读入数据、数据共轭、 2π 取模、量化并转换成灰度分布加到液晶显示器上. 这时, 从 ZYGO 干涉仪出射的平面波经过液晶显示器后就变成了凹的球面波, 由于其和透镜表面共轭, 因此被透镜前表面反射后沿原路返回. 再次经过相息图, 又变成平面波进入 ZYGO 干涉仪. 理论上, 其应得到平行直条纹或没有条纹. 实验测得的结果如图6(b), 其 PV 值为 0.32λ . 由图6(b)的干涉条纹可看出, 其基本上变成了平行直条纹. 说明液晶显示器确实能够用来检测光学表面.

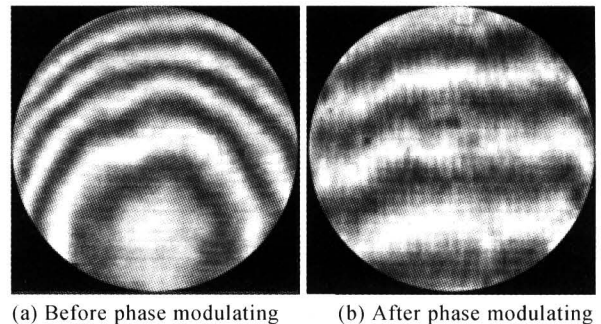


图6 干涉图
Fig. 6 The interferogram

4 结果与讨论

试验测得的结果可以看出, 利用液晶显示器产生相息图的方法确实可以实现对光学表面的检测. 但是同时会存在一些问题: 图6(b)中干涉图存在4条干涉条纹, 理想情况下应该没有干涉条纹. 这是由于检测系统中存在倾斜像差, 通过调整透镜的位置便可以去除. 由于其对检测透镜前表面几乎没有影响, 所以没有去除. 经过液晶显示器的补偿后, PV 值为 0.32λ , 和文献[10, 11]相比调制准确度较低. 分析认为, 这主要是由于液晶显示器的像素尺寸太大所致. 由于透镜表面为圆对称, 因此取模和量化都是圆对称的. 而液晶显示器的像素是长方形, 这相当于用多个长方形来形成一个圆, 很显然, 长方形的面积越大, 误差就越大. 因此, 相息图的衍射波面和透镜的前表面之间便存在一定误差, 导致液晶显示器的调制准确度下降. 因此, 如果减小液晶显示器像素的尺寸, 便可以实现高准确度的光学表面检测. 幸运的是, 现在市场上出售的液晶显示器的像素尺寸比本文所用的要小得多(最小尺寸为 $9\mu\text{m} \times 9\mu\text{m}$).

5 结论

根据液晶的动态响应和位相调制特性, 研究了利用液晶显示器检测光学表面的一种全新的检测方法. 通过引入相息图的方法, 解决了液晶显示器的小

调制量和光学检测中需要大调制量之间的矛盾. 实验中,把液晶显示器的改造为纯位相的空间光调制器,并测定了液晶显示器的位相调制特性. 实验测得:改造后的液晶显示器可实现 1λ 的调制量,因此,其可以用来实现相息图. 然后,利用计算机进行了相息图的模拟,并利用液晶空间光调制器产生了 3.4λ 的调制量. 最后,利用液晶显示器检测了凸透镜的前表面. 比较图 6(a)和图 6(b),可以看出,确实实现了对透镜表面的检测. 但同时也发现,如果想利用液晶显示器来检测光学表面,必须减小像素的尺寸. 本文虽然只检测了球面,但是该方法对其它光学表面如检测非球面同样有效.

参考文献

- MacGovern A J, Wyant J C. Computer generated holograms for testing optical elements. *Appl Opt*, 1971, **10**(3): 619~624
- Mercier R. Holographic testing of aspherical surfaces. *Proc of SPIE*, 1977, **136**: 208~214
- Liu H, Lu Z W, Li F Y, et al. Using curved hologram to test large-aperture convex surface. *Opt Express*, 2004, **12**(14): 3251~3256
- Burge J H, Anderson D S. Full aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates. *Proc of SPIE*, 1994, **2199**: 181~192
- Burge J H, Anderson D S, Milster T D, et al. Measurement of a convex secondary mirror using aholographic test plate. *Proc of SPIE*, 1994, **2199**: 193~198
- 沈为民,吴泉英,薛鸣球. 神光Ⅲ强激光光束远场诊断系统光学设计. *光子学报*, 2004, **33**(8): 964~969
Shen W M, Wu Q Y, Xue M Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 964~969
- 刘永军,胡立发,曹召良,等. 位相可控液晶空间光调制器的研究. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1799~1802
Liu Y J, Hu L F, Cao Z L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1799~1802
- 刘永军,宣丽,胡立发,等. 平行排列液晶器件时波前调制特性. *光子学报*, 2006, **35**(1): 65~68
Liu Y J, Xuan L, Hu L F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 65~68
- Aris Tanone, Zhang Zheng, Uang C - M, et al. Phase modulation depth for a real-time kinoform using a liquid crystal television. *Optical Engineering*, 1993, **32**(3): 517~521
- Hu L F, Xuan L, Liu Y J, et al. Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction with high precision. *Opt Express*, 2004, **12**(26): 6403~6409
- Cao Z L, Xuan L, Hu L F, et al. Investigation of optical testing with a phase-only liquid crystal spatial light modulator. *Opt Express*, 2005 **13**(4): 1059~1065
- Thurston R N, Berreman D W. Equilibrium and stability of liquid-crystal configurations in an electric field. *J Appl Phy*, 1981, **52**(1): 508~509
- Wang Xu, Daniel Wilson, Richard Muler, et al. Liquid-crystal blazed-grating beam deflector. *Appl Opt*, 2000, **39**(35): 6545~6555
- Tang Shu Tuen. Polarization optics of liquid crystal and its applications. PHD Thesis, Hongkong University of Science and Technology, P. 26 (2001)
- Norbert Lindlein. Analysis of the disturbing diffraction orders of computer-generated holograms used for testing optical aspherics. *Appl Opt*, 2001, **40**(16): 2698~2708

Application of the Liquid Crystal Kinoform for Optical Testing

Cao Zhaoliang^{1,2}, Hu Wusheng³, Hu Lifa¹, Liu Yongjun^{1,2}, Mu Quanquan¹, Xuan Li¹

1 *State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

3 *Jiyuan Vocational and technical College, Jiyuan 454650*

Received date: 2005-09-08

Abstract According to the dynamic response and phase modulation of the liquid crystal, the liquid crystal display (LCD) used for optical testing was investigated in the paper. The LCD was reconstructed into a phase-only spatial light modulator in the experiment. And the phase modulating characteristics were measured. It shows the phase modulation depth is more than one wavelength. The sphere wave with phase modulation magnitude 3.4λ is achieved by the kinoform method. The former surface of a convex lens was tested by ZYGO interferometer. The parallel straight fringes are obtained and PV is $1/3 \lambda$.

Keywords Optical testing; Liquid crystal; Kinoform; Phase modulation; Spatial light modulator



Cao Zhaoliang received his BS degree in Physics from Henan Normal University in 1998.

In 2003, he obtained his MS degree. Currently, he is working to his PhD in State Key Laboratory of Applied Optics, CIOMP, Chinese Academy of Sciences. His research interests include the liquid crystal optics and the diffractive optics.