

## 用于液晶盒表面面形检测的短相干载频干涉方法

杨光, 陈磊, 胡晨辉, 张正宇, 朱文华

### 引用本文:

杨光, 陈磊, 胡晨辉, 等. 用于液晶盒表面面形检测的短相干载频干涉方法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(2): 108–114.

YANG Guang, CHEN Lei, HU Chen-hui, et al. Low coherence carrier frequency interference method for measurement of the liquid crystal cell surface[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(2): 108–114.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203502.0108>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 不同初始分布向列相液晶电容特性的相场法研究

Phase field method in capacitance characteristics of nematic liquid crystals with different initial alignments

液晶与显示. 2019, 34(4): 327–334 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193404.0327>

### 用全漏光导波技术测量反射式混合型扭曲向列相液晶盒的指向矢分布

Measurement of director distribution in reflective mixed-mode twisted nematic liquid crystal cell using fully leaky waveguide technique

液晶与显示. 2016, 31(6): 540–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0540>

### 短螺距手性液晶热敏旋光特性的研究

Thermal sensing optical rotatory characteristics of short pitch cholesteric liquid crystal

液晶与显示. 2015, 30(1): 10–15 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153001.0010>

### 基板表面锚泊对液晶全漏导模影响的理论研究

Theoretical study of the surface anchoring effect on the full leaky waveguide mode of liquid crystal

液晶与显示. 2018, 33(6): 483–489 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183306.0483>

### 低电压高透过率的波纹电极透反蓝相液晶显示器

Low voltage and high transmittance transreflective blue-phase liquid crystal display with corrugated electrodes

液晶与显示. 2017, 32(4): 249–252 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173204.0249>

文章编号:1007-2780(2020)02-0108-07

# 用于液晶盒表面面形检测的短相干载频干涉方法

杨 光<sup>1</sup>, 陈 磊<sup>2\*</sup>, 胡晨辉<sup>2</sup>, 张正宇<sup>2</sup>, 朱文华<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 先进发射协同创新中心, 江苏 南京 210094;

2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**液晶盒表面面形的质量会影响空间光调制器的性能。为了精确测量液晶盒表面面形,提出了短相干载频干涉方法。利用短相干扩展光源进行照明,产生的参考光和测试光之间形成定域干涉,通过控制参考面和液晶盒表面之间的倾角,引入合适的载频,得到待测载频干涉条纹;同时空液晶盒空气层上下表面干涉,形成背景干扰条纹,从而在 CCD 相机中采集到混叠有一组干扰条纹的单幅载频干涉图。通过空间傅里叶变换方法滤除背景和干扰条纹的频率信息,提取并恢复待测条纹包含的面形数据。实验检测了两块玻璃基片错位粘合制成的液晶盒表面面形,解算出波面峰谷值 PV 为  $8.286\lambda$ ,波面均方根值 RMS 为  $1.782\lambda$ 。使用该方法 and ZYGO 干涉仪进行的对比实验中 PV 值和 RMS 值分别相差  $0.023\lambda$  和  $0.004\lambda$ ,两种测量方法得到的结果一致。该方法能够克服多表面干涉的问题,实现液晶盒表面面形的精确测量。

**关键词:**液晶盒;短相干光;傅里叶变换;面形检测

**中图分类号:**O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20203502.0108

## Low coherence carrier frequency interference method for measurement of the liquid crystal cell surface

YANG Guang<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>2\*</sup>, HU Chen-hui<sup>2</sup>, ZHANG Zheng-yu<sup>2</sup>, ZHU Wen-hua<sup>2</sup>(1. *Advanced Launching Co-innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;*2. *School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

**Abstract:** The quality of the liquid crystal cell surface can affect the performance of the spatial light modulator. In order to accurately measure the liquid crystal cell surface, a low coherent carrier frequency interference method is proposed. Illuminating with a low coherent extended light source, forming a localized interference between the reference light and the test light, and adding a suitable carrier frequency by controlling the tilt angle between the reference surface and the surface of the liquid crystal cell, the carrier frequency interference fringe to be tested is obtained. The upper and lower surfaces of the air layer of the empty liquid crystal cell form a background interference fringe, so that

收稿日期:2019-07-02;修订日期:2019-10-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.U1731115)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.U1731115)

\* 通信联系人, E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn

a single carrier frequency interference pattern with a set of interference fringes is collected in the CCD camera. The frequency information of the background and the interference fringes is filtered by the spatial Fourier transform method, and the surface data of the fringes to be tested is extracted and re-stored. The surface of the liquid crystal cell made by dislocation bonding of two glass substrates was tested. The peak-to-valley value PV of the surface is  $8.28\lambda$ , and the root mean square value RMS is  $1.78\lambda$ . Comparative experimental results conducted by the method and ZYGO interferometer indicate that the differences of PV and RMS are  $0.02\lambda$  and  $0.004\lambda$ . The results obtained by the two measurement methods are consistent. The method can overcome the problem of multi-surface interference and measure the liquid crystal cell surface precisely.

**Key words:** liquid crystal cell; low coherence light; Fourier transform; surface test

## 1 引言

液晶空间光调制器是光信息处理中的重要元件,利用它的振幅和位相调制特性可以实现对光波方向和空间分布的控制,被广泛应用于光束偏转、动态全息、波前校正系统、空间光通信等领域<sup>[1-8]</sup>。空间光调制器中的液晶盒由两块透明玻璃基片粘合而成<sup>[9]</sup>,如果玻璃基片的表面面形不好,入射光穿过玻璃基片进入液晶层之前,其波前已经被引入了附加相位,经过空间调制器调制的不再是预期的入射波前,这给处理后的波前结果中带来一定的误差,导致空间光调制器的性能受到影响。因此有必要对液晶盒表面面形进行有效测量。

现有的光学元件检测方法主要是干涉法<sup>[10-11]</sup>。未注入液晶的空液晶盒结构可以简化为玻璃基片-空气层-玻璃基片的结构。用一般的干涉方法测量液晶盒表面面形时,两块玻璃基片的前后表面和参考光之间、玻璃基片表面两两之间都会产生干涉,导致多表面干涉现象的出现,使用传统的移相干涉测量技术,无法正确解算被测面面形。针对这一问题,国内外研究人员做了大量研究。Groot 等人提出了基于加权波长调谐相移的算法<sup>[12-13]</sup>,通过设计合适的采样窗函数提取待测信号,但该方法只适用于被测平行平板的厚度和干涉腔长度满足一定比例要求的情况下,具有很大的局限性。快速傅里叶变换方法通过在干涉仪上采集一幅空间载频的三表面干涉条纹图,从单幅干涉图中提取出原始待测波面的相位信息,从而恢复被测件的面形,但对于超过三表面干涉的问题,该方法不能将各干涉条纹的频谱信息

在频域上完全分离,从而无法正确解算待测面形<sup>[14-15]</sup>。使用波长调谐干涉仪,结合傅里叶变换移相技术,能够提取所需干涉信号。但该方法计算量较大,容易受到气流扰动和环境振动影响,所需精度较高的波长调谐干涉仪导致测试成本较高<sup>[16-17]</sup>。

本文提出了用于液晶盒表面面形检测的短相干载频干涉方法,能够克服多表面干涉的问题,有效解算出被测表面面形分布。

## 2 原理

测试原理如图1所示,将待测空液晶盒简化为两块粘合在一起的玻璃平板1和2,两块玻璃平板中间白色部分为空气层,边缘不规则黑色部分为粘合胶。参考面R和液晶盒被侧面A贴放在一起,在短相干扩展钠光灯的照明下,参考面和R反射的参考光和待侧面A反射的测试光形成干涉,产生待测干涉条纹。扩展光源相当于多个点光源,由不同点源出发到达空间某一点产生干涉的两支相干光的光程差不同,在光程差相差较

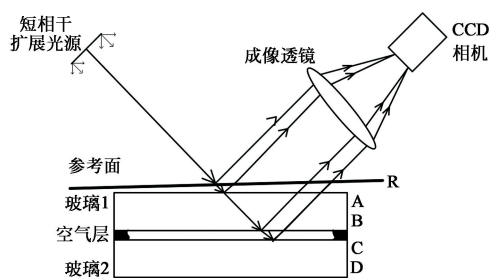


图1 短相干载频干涉测量系统示意图

Fig.1 Framework of low coherence carrier frequency interferometry measuring system

大的区域,由于条纹非相关叠加,无法观察到干涉条纹;在光程差相差较小的区域,干涉条纹仍能保持高可见度。该实验中的待测干涉条纹则定域在参考面附近。控制参考面与待测面之间的倾角,在待测条纹中引入适当的载频,通过成像透镜被 CCD 相机采集。

由于钠光双线光谱分别为 589.0 nm 和 589.6 nm,其对应的相干长度  $\Delta_{\max} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \approx 0.6 \text{ mm}$ ,玻璃基底的厚度为 1 mm,大于光源的相干长度,因此每块玻璃前后表面的反射光也不会形成干涉条纹。两块玻璃平板的其他表面和参考面的光程差大于光源的相干长度,也不会产生干涉条纹。而两块玻璃基底之间的空气层厚度即液晶盒厚基本在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ,小于钠光灯的相干长度,因此能够产生一组背景干涉条纹。最终,CCD 相机采集到了两种干涉条纹叠加在一起的图,即参考面 R 反射的参考光和玻璃 1 的前表面 A 反射的测试光形成的待测干涉条纹图,以及空气层上下玻璃表面 B 和 C 干涉形成的背景条纹图。

下面介绍处理单幅干涉图的傅里叶变换方法。

采集到的干涉图像的光强分布可以表示为:

$$I(x, y) = a_1(x, y) + a_2(x, y) + b_1(x, y) \cos[2\pi f_x x + 2\pi f_y y - \varphi_1(x, y)] + b_2(x, y) \cos\varphi_2(x, y), \quad (1)$$

式中:  $a_1(x, y)$  和  $a_2(x, y)$  分别是待测条纹和背景条纹的背景光强分布,  $f_x$  和  $f_y$  是待测干涉条纹在  $x$  和  $y$  方向上引入的空间载频,  $b_1(x, y)$  和  $b_2(x, y)$  分别是待测条纹和背景条纹的调制度,  $\varphi_1(x, y)$  和  $\varphi_2(x, y)$  分别是含有待测条纹和背景条纹相位信息的相位分布函数。

将式(1)改写成复数表达式:

$$I(x, y) = a_1(x, y) + a_2(x, y) + c_1(x, y) \exp(i2\pi f_x x + i2\pi f_y y) + c_1^*(x, y) \exp(-i2\pi f_x x - i2\pi f_y y) + c_2(x, y) + c_2^*(x, y), \quad (2)$$

式中:  $c_1(x, y) = 1/2b_1(x, y) \exp(i\varphi_1(x, y))$ ,  $c_2(x, y) = 1/2b_2(x, y) \exp(i\varphi_2(x, y))$ ,  $c(x, y)$  和  $c^*(x, y)$  互为共轭复数, \* 表示复共轭。

对式(2)作二维傅里叶变换运算,得到:

$$I(f_1, f_2) = A_1(f_1, f_2) + A_2(f_1, f_2) + C_1(f_1 - f_x, f_2 - f_y) + C_1^*(f_1 + f_x, f_2 + f_y) +$$

$$C_2(f_1, f_2) + C_2^*(f_1, f_2), \quad (3)$$

式中:  $A_1(f_1, f_2) + A_2(f_1, f_2)$  是干涉图背景光强的频谱,即零级谱分布函数,  $C_1(f_1 - f_x, f_2 - f_y)$  和  $C_1^*(f_1 - f_x, f_2 - f_y)$  分别是待测条纹正负一级谱的函数分布,包括了待测波面的频谱信息和载频信息。  $C_2(f_1, f_2)$  和  $C_2^*(f_1, f_2)$  分别是背景条纹正负一级谱的函数分布。

采用一个中心频率为  $(f_x, f_y)$ , 频带宽度适当的滤波器,可以将正一级频谱分离开来。再将分离出来的频谱在频域上从  $(f_x, f_y)$  平移到原点得到  $C(f_1, f_2)$ , 即可去除背景光强和背景条纹,只包含待测波面的频谱,再对其进行二维逆傅里叶变换,得到:

$$c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y) \exp[i\varphi(x, y)], \quad (4)$$

从式(4)可以求出带有波面信息的位相分布函数  $\varphi(x, y)$ :

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\text{Image}[c(x, y)]}{\text{Real}[c(x, y)]}, \quad (5)$$

其中:  $\text{Image}[c(x, y)]$  和  $\text{Real}[c(x, y)]$  分别是  $c(x, y)$  的实部和虚部,求得的反正切值的范围在  $-\pi$  到  $+\pi$  之间,此时恢复出来的被测波面的相位分布不连续,需要进行解包裹运算,进而恢复待测面形。

### 3 实 验

#### 3.1 采集干涉图

根据上述实验原理搭建测量系统,如图 2 所示。实验中用到的被测件是由两块玻璃基片错位粘合在一起的未注入液晶的液晶盒,每个玻璃基片长 25 mm,宽 30 mm,厚 1 mm,如图 3 所示。将被

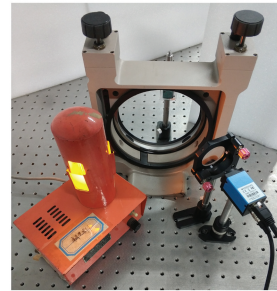


图 2 短相干载频干涉测量系统

Fig. 2 Low coherence carrier frequency interferometry measuring system

测件放在测量系统中,在短相干光源钠光灯的照明下,同时观察到参考面与被测面形成的待测干涉条纹和玻璃基片空气层形成的背景条纹。为了使两种条纹的频谱在频域上分离,增加参考面和待测面之间的相对倾斜量,在干涉图中引入适当的载频,得到细密的高载频待测干涉条纹,如图4所示,其中椭圆形状的低频条纹是两块玻璃基片空气层上下两个表面形成干涉产生的背景条纹。



图3 待测件  
Fig.3 Measuring objective

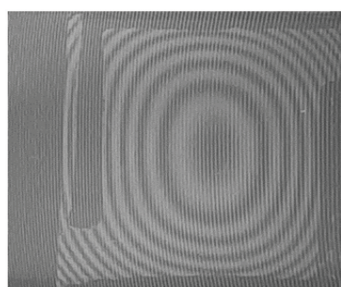


图4 干涉图  
Fig.4 Interferogram

### 3.2 处理干涉图

对图4所示的干涉图作傅里叶变换,得到频谱分布如图5所示。从频谱图中找到+1级频谱

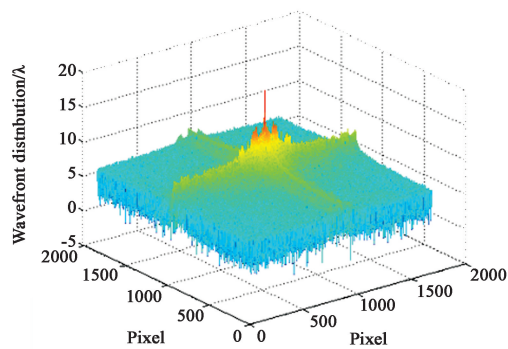


图5 频谱图  
Fig.5 Spectrogram

的位置和带宽,用“Hanning窗”滤波窗口取出+1

级频谱分量并移至原来的零级频谱处,再进行傅里叶逆变换,反正切得到相位分布数据,如图6所示,再进行相位解包和消倾斜操作处理,得到被测面的面形分布数据,如图7所示。从干涉图可看出,除了背景条纹,错位粘合玻璃平板还导致不规则边缘的产生,但短相干载频干涉方法能够有效避免背景条纹和不规则边缘的影响,有效计算出被测液晶盒表面的面形分布,波面峰谷值PV为 $8.286\lambda$ ,波面均方根值RM为 $1.782\lambda$  ( $\lambda = 589\text{ nm}$ )。

总结上述计算流程如图8所示。

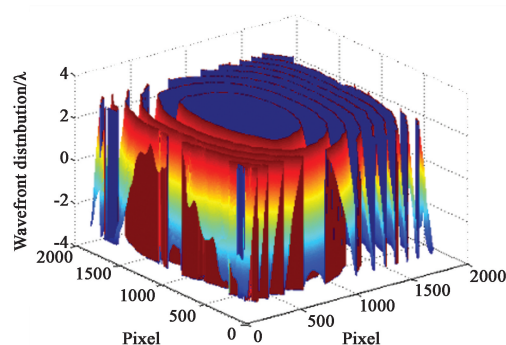


图6 包裹相位图  
Fig.6 Unwrapping phase

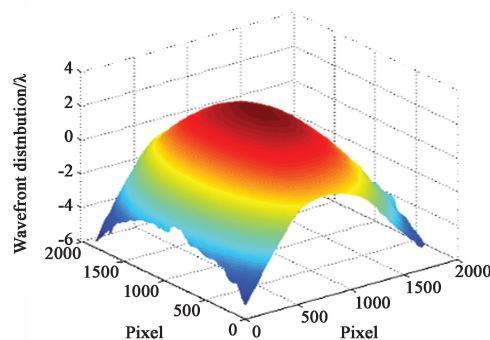


图7 解算的面形结果  
Fig.7 Resolved surface result

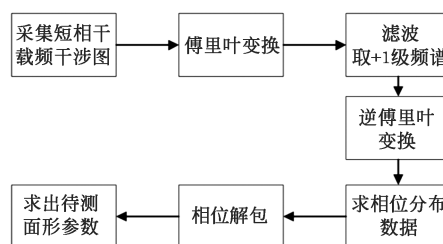


图8 短相干载频干涉方法流程图  
Fig.8 Flowchart of low coherence carrier frequency interferometry method

### 3.3 验证实验

如果用 ZYGO 干涉仪直接测量液晶盒表面面形,将会产生多表面干涉现象,不能正确解算待测面形。由于玻璃基片厚度较小,被粘合之后的基片有可能受到应力作用导致面形发生变化,若除去液晶盒两块玻璃基片之间的粘合胶使其分开再进行测量,应力的影响会导致对比实验不具有说服力。因此为了验证短相干载频干涉方法测量结果的准确性,分别用该方法和 ZYGO GPI 型号干涉仪测量同一块玻璃基片,短相干载频干涉法测得波面峰谷值 PV 为  $0.658\lambda$ ,波面均方根值 RMS 为  $0.111\lambda$ ,ZYGO 干涉仪测得波面峰谷值 PV 为  $0.635\lambda$ ,波面均方根值 RMS 为  $0.107\lambda$ ,如图 9 和图 10 所示。两种方法得到的测量结果相吻合,从而说明短相干载频干涉法测量液晶盒表面面形的准确性。

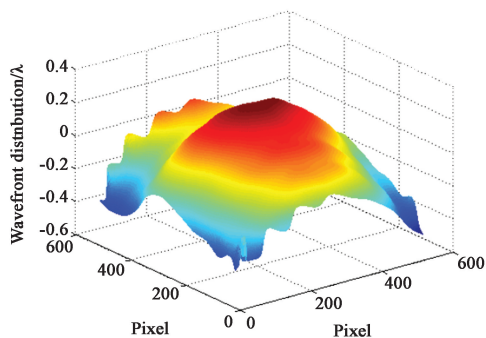


图 9 短相干载频干涉法测量结果

Fig.9 Result measured by low coherence

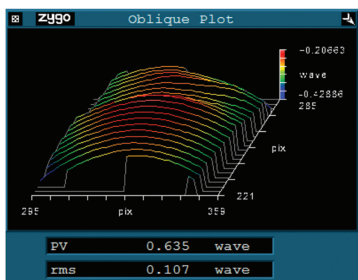


图 10 ZYGO GPI 干涉仪测得面形结果

Fig.10 Result measured by ZYGO GPI

## 4 讨论

### 4.1 载频条纹的密度对测量结果的影响

如果载波条纹数较少,进行傅里叶变换时会产生频谱混叠现象,如图 11 所示,不能准确分离出待

测频谱。载波条纹数与载频的大小成正比,载波条纹数越多,引入的载频量越大,使得一级频谱和零级频谱的间隔越大。但是载频量太大会导致测试精度降低,根据电信号调制理论和 Nyquist 采样定理,空间载频量应小于采样频率的  $1/3$ ,最理想的倾斜量是每个条纹占据 4 个像素点,此时没有频谱混叠的现象,能够减小测量误差<sup>[18]</sup>。

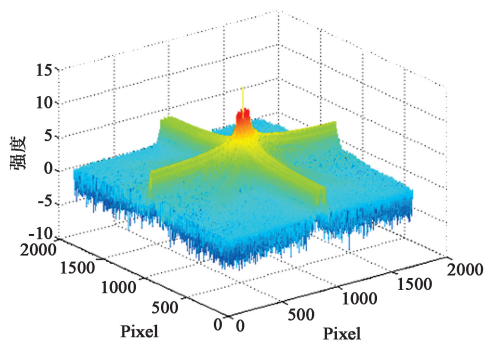


图 11 发生混叠的频谱

Fig.11 Aliasing spectrum

### 4.2 回程误差

在一般的 FFT 法和移相干涉测量中,测量系统中实际出射的参考波前并非理想,导致从被测面反射回来的每条光线以不同的反射角再次进入干涉仪中,造成非共光路情况的发生并产生不同大小的像差,即回程误差。该实验采用短相干的扩展钠光灯作为测量系统的光源,产生的待测干涉条纹定域在参考面和被测面之间的空气薄层附近,属于定域干涉条纹,能够有效规避回程误差,进而提高测量精度。

## 5 结论

本文提出了用于液晶盒表面面形测量的短相干载频干涉方法。该方法利用短相干扩展钠光灯作光源构建测量系统,产生定域条纹,引入合适的载频,采集单幅载频干涉图,通过快速傅里叶变换方法,有效地解算出被测件的面形数据。分别用该方法和 ZYGO 干涉仪对同一块玻璃平板进行检测,结果显示,波面峰谷值偏差为  $0.023\lambda$ ,波面均方根值偏差为  $0.004\lambda$ 。该方法能够避免背景条纹的干扰和频谱混叠现象,不会引入一般傅里叶变换方法中的回程误差,且对环境扰动因素不敏感,测量成本低。

## 参 考 文 献:

- [1] 李小平,胡五生,于洪丽,等.基于液晶空间光调制器的相位差波前探测技术定量研究[J].液晶与显示,2017,32(3): 234-239.  
LI X P, HU W S, YU H L, *et al.* Quantitative analysis on phase diversity technique based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 234-239. (in Chinese)
- [2] LINNENBERGER A, SERATI S, STOCKLEY J. Advances in optical phased array technology [C]//*Proceedings of SPIE* 6304, *Free-Space Laser Communications VI*. San Diego: SPIE, 2006: 268-298.
- [3] RESLER D P, HOBBS D S, SHARP R C, *et al.* High-efficiency liquid-crystal optical phased-array beam steering [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(9): 689-691.
- [4] 李颖奎,齐冀,张洁,等.基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究[J].液晶与显示,2018,33(9):764-771.  
LI Y K, QI J, ZHANG J, *et al.* Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(9): 764-771. (in Chinese)
- [5] 李森森,吴凡,吕志伟.基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J].光电技术应用,2017,32(3):19-23,58.  
LI S S, WU F, LÜ Z W. Beam shaping of laser nearfield based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(3): 19-23, 58. (in Chinese)
- [6] 高云舒.液晶空间光调制器的衍射特性及应用研究[D].北京:北京交通大学,2015.  
GAO Y S. Research on diffraction effect of LC-SLM and its applications [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [7] 陈沁,王华村,胡鑫,等.空间光调制器及其在空间光通信中的应用[J].激光与光电子学进展,2016,53(5):050008.  
CHEN Q, WANG H C, HU X, *et al.* Spatial light modulator and its applications in free-space optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050008. (in Chinese)
- [8] 郑贤良,刘瑞雪,夏明亮,等.液晶自适应光学视网膜校正成像技术研究[J].中国光学,2014,7(1):98-104.  
ZHENG X L, LIU R X, XIA M L, *et al.* Retinal correction imaging system based on liquid crystal adaptive optics [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 98-104. (in Chinese)
- [9] 陈洪财,张荣学.基于图像识别的液晶盒厚在线测量系统[J].液晶与显示,2011,26(4):561-564.  
CHEN H C, ZHANG R X. On-line measurement system of liquid crystal cell gap based on image recognition [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(4): 561-564. (in Chinese)
- [10] MALACARA D, RODDIER F. Optical shop testing [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(7): 1037.
- [11] BRUNING J H, HERRIOTT D R, GALLAGHER J E, *et al.* Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [12] DE GROOT P, DECK L. Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(17): 1462-1464.
- [13] DEGROOT P J, DECK L L. Surface profiling by frequency-domain analysis of white light interferograms [C]//*Proceedings of SPIE* 2248, *Optical Measurements and Sensors for the Process Industries*. Frankfurt, Germany: SPIE, 1994: 101-104.
- [14] 徐建程,石琦凯,柴立群,等.干涉测量系统中杂散条纹影响的抑制[J].强激光与粒子束,2006,18(11):1783-1786.  
XU J C, SHI Q K, CHAI L Q, *et al.* Effect reduction of spurious fringes in interferometric measurement system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(11): 1783-1786. (in Chinese)
- [15] MUÑOZ-MACIEL J, CASILLAS-RODRÍGUEZ F J, MORA-GONZÁLEZ M, *et al.* Phase recovery from a single interferogram with closed fringes by phase unwrapping [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(1): 22-27.
- [16] 任寰,马力,刘旭,等.多表面干涉下的光学元件面形检测[J].光学精密工程,2013,21(5):1144-1150.  
REN H, MA L, LIU X, *et al.* Optical element test with multiple surface interference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1144-1150. (in Chinese)
- [17] 马力,张国伟,李勇,等.基于波长移相调谐的多表面干涉研究[J].光学与光电技术,2014,12(5):46-50.  
MA L, ZHANG G W, LI Y, *et al.* Multiple surfaces interference testing based on wavelength-tuned phase shifting [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(5): 46-50. (in Chinese)

- [18] MACY W W. Two-dimensional fringe-pattern analysis [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(23): 3898-3901.

作者简介:



杨 光(1995—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,2017 年于南京理工大学获得学士学位,主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: guangyang @ njust.edu.cn



陈 磊(1964—),男,江苏南京人,博士,研究员,博士生导师,1997 年于南京理工大学获得博士学位,主要从事光学动态干涉测试及光学测试仪器方面的研究。E-mail: chenlei @ mail.njust.edu.cn