

文章编号: 0253-2239(2006)04-0557-5

# 在粗糙表面上用液晶空间光调制器进行振动测量

叶必卿<sup>1</sup> 松田清史<sup>2,3</sup> 福智昇央<sup>2</sup> 原 勉<sup>2</sup> 陈 军<sup>1</sup>

1 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027  
2 滨松光子学株式会社, 日本 434-860  
3 日本国家产业科学技术研究所, 日本 305-8565

**摘要:** 为实现在一段时间内连续实时观测振动物体的全息干涉图形,采用覆盖铝箔的喇叭作为振动物体,利用铝箔原有未经特殊处理表面反射的漫反射光成像,并用光寻址液晶空间光调制器(Liquid crystal-spatial light modulator, LC-SLM)作为全息记录载体,来实现振动测量。实验中采用时间平均干涉测量法,得到了不同振动频率下物体的干涉图形。同时在连续改变振动物体的振动频率时,可以清晰地观察到物体振动全息干涉图形的变化过程,即近实时的全息干涉图形。

**关键词:** 全息光学; 振动测量; 时间平均; 光寻址液晶空间光调制器

中图分类号: O438.1 文献标识码: A

## Vibration Measurements of Rough Surfaces Using an Liquid Crystal Spatial Light Modulator

Ye Biqing<sup>1</sup> Kiyofumi Matsuda<sup>2,3</sup> Norihiro Fukuchi<sup>2</sup> Tsutomu Hara<sup>2</sup> Chen Jun<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027  
2 Hamamatsu Photonics K. K., Japan 434-8601  
3 National Institute of Industrial Science and Technology, Japan 305-8565

**Abstract:** Vibration measurement, observing the holographic interference patterns of vibrating objects in real time in a period of time, is realized with a system, in which a speaker with aluminum foil is used as the vibrating object, imaging is realized with the diffuse reflection light from the raw surface of the aluminum foil, and an optically addressed liquid crystal spatial light modulator is used as the recorder. Time average interference measurement method is used in the experiment, and the vibration interference patterns of the object with different vibrating frequencies is obtained. When the vibrating frequency changes continuously, the changing process of the holographic interference patterns of the object is observed clearly, and the near-real time holographic interference patterns are gained.

**Key words:** holographic optics; vibration measurement; time-average; optical-address liquid crystal spatial light modulator

## 1 引 言

1965年由R. L. Powell和K. A. Stetson提出的时间平均干涉法是实时全息干涉技术的一种有效方法。它具有高精度、高灵敏度、信息量大、可进行整体观察、后继处理直观等特点,已成为振动测量研究中一种有效的方法<sup>[1~3]</sup>。经常被用于乐器、机械振动分析,如轿车车身的振动测量分析。

目前作为实时全息记录材料通常有四种:光

导热塑全息记录片、光折变晶体,多量子阱材料及光致聚合物。光导热塑全息记录片有全色响应、存储稳定的特点,但是其响应速度慢,存在疲劳现象,并且不能实现自动实时显影<sup>[4]</sup>。多量子阱材料开关时间短,可用于多波长,但是它有衍射效率的限制。光折变晶体是实时全息最常用的记录材料,特别是LiNbO<sub>3</sub>,它电光系数大、衍射效率高、能实时就地显影,但晶体成像面积小<sup>[5]</sup>。光致聚合物具有高分辨

作者简介: 叶必卿(1978~),女,浙江杭州人,浙江大学博士研究生,主要从事激光与非线性光学方面的研究。

E-mail: canoo@zju.edu.cn

收稿日期: 2005-04-29; 收到修改稿日期: 2005-10-11

率、高衍射效率等诸多优点,由于其乐观的商业应用前景是近几年全息记录的研究热点,但光致聚合反应是不可逆反应,因此光致聚合物的全息图不能被擦除和再记录,只适用于一次写入多次读出系统<sup>[8,9]</sup>。用光寻址的液晶空间光调制器作为全息记录载体可以记录任意多次全息图而不产生损耗或者疲劳现象;可以实时干法地进行“定影”和“显影”;再现时由于空间光调制器本身的特点,其读出光束波长可与入射波长不同。

## 2 空间光调制器

### 2.1 结构及原理

本实验采用滨松公司的 i369 型反射式光寻址空间光调制器。其结构如图 1 所示: $\alpha$ -Si:H 层作为光电导层用来实现光寻址,将某点写入光的光强强度转化为对液晶层上对应点的电压强度。液晶层被夹在玻璃片和高反射率绝缘层之间,用以实现光调制。读出光被反射层反射,两次经过液晶层后,读出光的相位就带有写入光的光强信息。

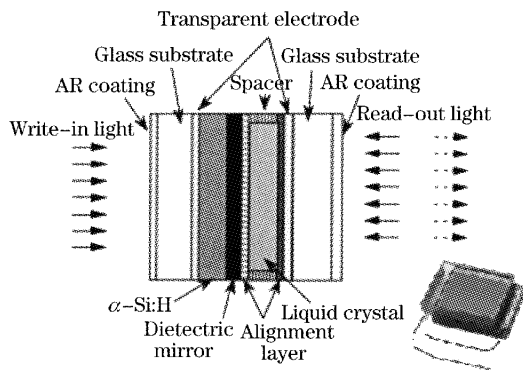


图 1 空间光调制器的结构

Fig. 1 The structure of spatial light modulator

图 2 为空间光调制器的原理图。图 2(a)图是没有写入光时调制器液晶层中液晶分子的排列状

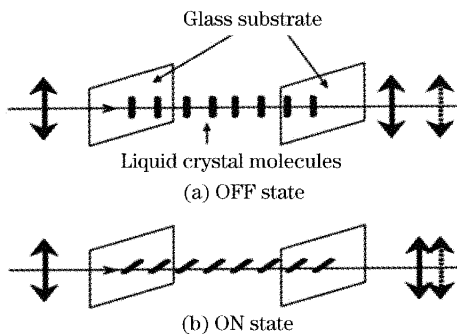


图 2 相位调制原理

Fig. 2 The principle of phase modulation

况。此时由于液晶层上几乎没有外加电压,液晶分子不发生倾斜。图 2(b)为有写入光入射时液晶分子的排列状况。此时液晶层有外加电压,液晶分子发生倾斜。此时液晶层的光折射率发生变化,使得反射光的相位改变。由于这种空间光调制器中液晶分子排列为平行排列而不是扭曲排列,它对反射光的偏振没有调制作用,因此用这种空间光调制器进行全息记录时,可以看作是一个相位记录介质。

### 2.2 空间光调制器的特性

测量了空间光调制器的空间分辨率,灵敏度以及在不同空间频率下调制器的衍射效率。

空间分辨率:利用双光束干涉在调制器的读出面上形成光栅,通过测量读出光对光栅的衍射可得该调制器的空间分辨率为 100 lp/mm。

调制器的灵敏度:通过改变写入光的光强,测量读出光被空间光调制器反射后的功率可测得其灵敏度,结果如图 3 所示。

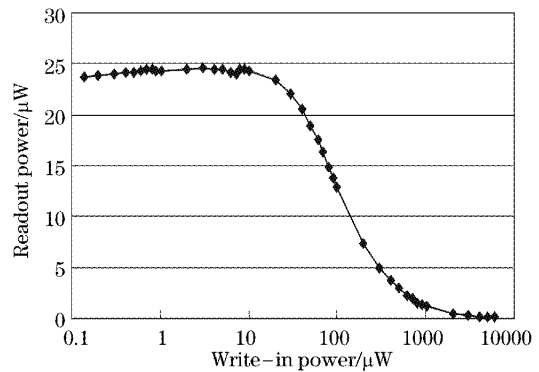


图 3 空间光调制器的灵敏度

Fig. 3 The sensitivity of SLM

光调制器的衍射效率:同测量空间分辨率的方法相同,利用双光束干涉在调制器的读出面上形成光栅,测量在不同空间频率下光调制器的一级衍射效率,其结果如图 4 所示。

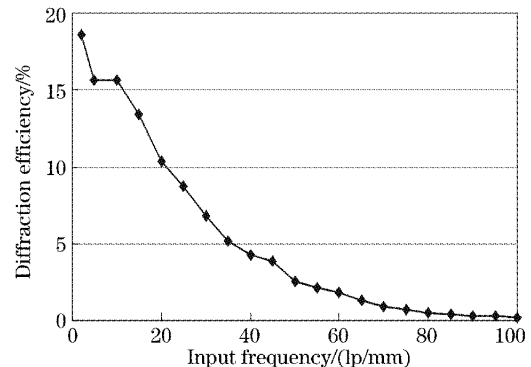


图 4 空间光调制器的衍射效率

Fig. 4 Diffraction efficiency varies with input frequency

### 3 实时全息振动测量

#### 3.1 实验装置

实验装置如图 5 所示, He-Ne 激光器 1 发出的光作为写入光, 经过由  $L_0$ 、 $L_1$  组成的望远镜系统扩束及准直, 然后通过矩形孔  $A_1$  以入射角大于  $35^\circ$  的方向入射到振动物体上。物体为覆盖在喇叭上的普通铝箔, 表面未经特殊处理, 对入射 He-Ne 光发生漫反射。在大角度入射的情况下在反射角方向上仍

然有足够强的光被反射。反射光和从分光镜  $S_1$ 、 $S_2$  引出的参考光发生干涉形成全息干涉条纹。该全息条纹通过一个由  $L_2$ 、 $L_3$  组成的  $4f$  系统成像在空间光调制器(SLM)的写入面。在  $4f$  系统的共焦面上放置一个  $\phi=5\text{ mm}$  的小孔  $A_2$  滤波。写入激光器功率  $20\text{ mW}$ , 矩孔宽  $8\text{ mm}$ 。振动物体是一张紧绷的铝箔, 被固定在直径为  $65\text{ mm}$  的喇叭上, 厚度为  $0.05\text{ mm}$ 。喇叭的驱动电流为正弦电流。

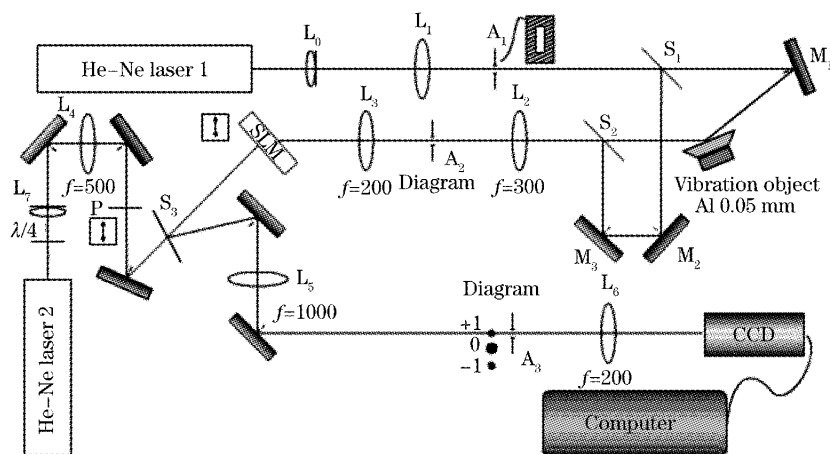


图 5 振动测量实验装置图

Fig. 5 The optical setup of vibration measurements

He-Ne 激光器 2 发出的光作为读出光, 由于出射的光为椭圆偏振光, 因此用  $\lambda/4$  波片将其转换为线偏光以达到足够的光强。激光经由  $L_7$ 、 $L_4$  望远镜系统扩束及准直后入射到空间光调制器的读出面。空间光调制器与  $L_5$ 、 $L_6$  及 CCD 形成一个  $4f$  系统。用小孔  $A_3$  在  $4f$  系统的共焦面上滤波。由 CCD 捕捉空间光调制器上记录图像的一阶衍射分量。读出激光器功率为  $6.9\text{ mW}$ 。空间光调制器工作在相位调制的工作模式上, 偏振片 P 方向与空间光调制器的液晶分子方向平行。

#### 3.2 时间平均法

图 5 中表示的测量系统对喇叭振动进行了全息时间平均法测量。其基本原理如下:

由 He-Ne 激光器 1 发出的光准直后由分光镜  $S_1$  分为两路, 由  $M_1$  反射到喇叭上的为物光, 由  $M_2$ 、 $M_3$  及分光镜  $S_2$  反射的光为参考光。物光及参考光在空间光调制器上干涉形成全息图像, 并由空间光

调制器实时记录这一全息图。实验中进行的时间平均全息测量法, 记录时间大于  $0.1\text{ s}$ , 而喇叭的振动周期为  $0.5\sim 3\text{ ms}$ , 因为记录时间远大于物体振动周期, 因此记录时间可认为是无限长。可以设想为无数静态全息图重叠记录在同一记录载体上。在图像再现时, 得到的物体原始像上附加有干涉条纹。这些干涉条纹带有物体振幅的信息。这称为时间平均全息图。

假设参考光波  $r(x, y) = A_r \exp[i\phi(x, y)]$ , 物光  $o(x, y, t) = A_o \exp[i\phi(x, y, t)]$ 。  $A_r$  为参考光波的振幅,  $A_o$  为物光的振幅, 物体振动引起的相位差为  $\phi(x, y, t) = kA(x, y) \cos(\omega t) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$ , 其中  $A(x, y)$  为振动面上某点的振幅,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为激光波长,  $\omega$  为物体振动的角频率,  $\theta_1$  为入射到振动面某点的光线与该点振动面的夹角,  $\theta_2$  为反射光与该点振动面的夹角。则在曝光时间  $T$  内的时间平均光强分布为:

$$\langle \phi(x, y) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T |o + r|^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T [o(x, y, t)o^*(x, y, t) + rr^* - o(x, y, t)r^* + o^*(x, y, t)r] dt,$$

全息材料的振幅透射系数与  $\langle \phi(x, y) \rangle$  成正比。当用参考光  $r(x, y)$  照射空间光调制器再现时, 有

$$\bar{A}(x, y) = \langle \phi(x, y) \rangle r(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T [o(x, y, t) o^*(x, y, t) r + r^2 r^* - o(x, y, t) r r^* + o^*(x, y, t) r^2] dt,$$

其中第一、第二项为直射光,第三项为原始像,第四项为共轭像。在单独考虑原始像时,出射光振幅为

$$\begin{aligned} \bar{A}(x, y) &= \frac{r r^*}{T} \int_0^T o(x, y, t) dt = \frac{A_r^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} o(x, y, t) d(\omega t) = \\ &= \frac{A_r^2 A_p}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} A(x, y) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \cos(\omega t) \right] d(\omega t) = \\ &= A_r^2 A_p J_0 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} A(x, y) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \right], \end{aligned}$$

令  $H(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} A(x, y) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$ , 因此可知 CCD 上接受到的光强分布可表示为

$$I(x, y) = \bar{A}^2(x, y) \propto J_0^2 [H(x, y)] = J_0^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} A(x, y) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2) \right], \quad (1)$$

(1)式表明再现后的强度分布按零级贝塞尔函数的平方分布<sup>[6,7]</sup>。

当  $H(x, y)$ , 即  $\frac{2\pi}{\lambda} A(x, y) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$ , 取值为 2.4048, 5.5201, 8.6537, 11.7315, 14.9309 等时, 零级贝塞尔函数的值为零, 即光强为零。对应于再现图中的暗条纹。当  $\frac{2\pi}{\lambda} A(x, y) (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)$  取零值时, 零级贝塞尔函数有本征极大值, 即光强最强。对应于再现图中的亮条纹。

因此不振动的地方即波节处  $A(x, y)$  等于零, 再现光强最强, 对应干涉的最亮条纹。振动得最剧烈的点, 再现为暗点, 对应干涉的暗条纹。这样测出干涉图样上的光强极值就能得到振动面某点的振幅的相对值。

#### 4 结果及分析

实验得到了不同频率下振动物体的干涉图样。在实验中通过改变振动频率, 能方便地在连接到 CCD

的监视器上观察到实时的时间平均全息干涉图。

图 6 所示是在入射角为  $83.25^\circ$  时不同振动频率下振动物体的全息干涉结果。图 6(a) 为物体不振动情况下的再现结果, 由于全息像是成在倾斜的空间光调制器的写入面上, 在液晶光阀的表面玻璃上产生干涉, 形成多光束干涉条纹使得还原图像下方能够观察到一条横向的条纹。改变参考光束的光强能够适当缓解, 但是无法彻底消除。图 6(b) 是物体在振动频率为 343 Hz 时再现的全息干涉结果。由图可见干涉图样为三个同心圆, 由(1)式可知最亮的地方为波节, 最暗的地方为振幅最大处。可见此圆盘以频率 343 Hz 振动时, 以圆盘中心为中心, 其振幅沿径向规律分布。图 6(c) 是物体在振动频率为 1183 Hz 时的干涉结果, 在频率加大后波腹波节间距减小, 条纹加密, 但仍然成同心圆分布。图 6(d) 是物体在振动频率为 1947 Hz 时的干涉结果, 能够清楚的看到物体干涉条纹不再是同心圆, 而是成轴对称分布。

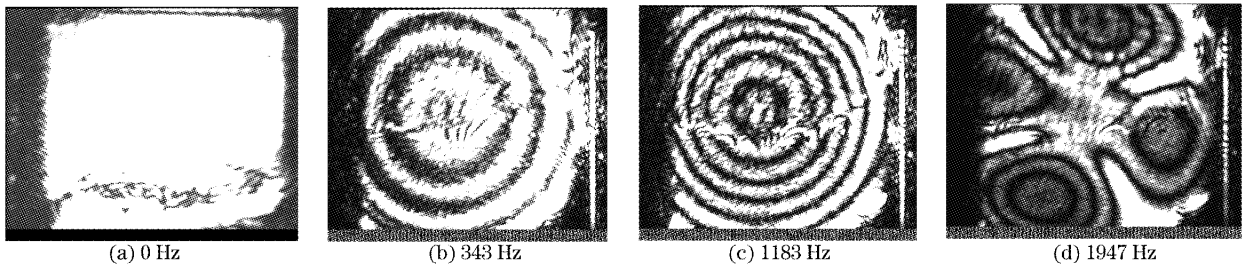


图 6 不同频率下振动物体的振动图像

Fig. 6 The image of vibration object at various vibration frequency

在实验中连续改变振动物体的振动频率可以清晰地观察到物体振动全息干涉图形的变化过程。空

间光调制器的响应时间是 70 ms, 制约了全息像的实时成像时间, 即物体振动的改变频率应低于 14 Hz。

## 5 结 论

使用一个光寻址的空间光调制器作为全息记录介质,使用时间平均法对物体进行了振动测量。在实验中利用振动物体的原有表面进行反射得到良好的近实时测量结果。该实验可以不在暗室下操作,装置易于操作,是一种有效的无损检测、探伤的方法。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Weichung, Hwang Chihung, Lin Shuyu. Vibration measurement by the time-averaged electronic speckle pattern interferometry methods[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(22): 4502~4509
- 2 Zhang Hongjun, Shi Huanwen, Zhen Yankun. Film vibration measurement using image plane hologram and time-average method [J]. *J. Shaanxi Normal university* (Natural Science Edition), 2004, **32**(2): 34~36 (in Chinese)  
张红军,石焕文,甄艳坤. 用像面全息时间平均法测量膜振动的研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004, **32**(2): 34~36
- 3 Yue Yalin, Qi Enrong, Shu Binhan. Vibratory behavior measurement based on holographic interferometry [J]. *J. Ship Mechanics*, 1998, **2**(6): 39~43 (in Chinese)  
岳亚霖,祁恩荣,徐秉汉. 激光全息干涉法测量结构振型技术[J]. 船舶力学, 1998, **2**(6): 39~43
- 4 Luo Zhenkun, Xu shuxiang, Xie Zhongming *et al.*. An experimental study on the holographic properties of a photothermoplastic material[J]. *Imaging Technology*, 1995, **1**(1): 7~11 (in Chinese)  
罗振坤,许澍翔,谢忠明等. 光导热塑全息特性实验研究[J]. 影像技术, 1995, **1**(1): 7~11
- 5 J. V. Alvarez-Bravo, L. Arizmendi. Coherent erasure and updating of holograms in LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Opt. Mat.*, 1995, **4**(2~3): 419~422
- 6 R. L. Powell, K. A. Stetson. Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction[J]. *J. Optical Society of America*, 1965, **55**(12): 1593~1598
- 7 T. Nakajima, H. Saito. Vibration analysis by holographic interferometry[J]. *Ouyoubutsuri*, 1970, **39**(3): 228~233 (in Japanese)
- 8 Huang Mingju, Yao Huawen, Chen Zhongyu. Study of high-density holographic characteristics of a novel green-sensitive photopolymer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 748~750 (in Chinese)  
黄明举,姚华文,陈仲裕等. 一种新型绿光敏感高密度全息光致聚合物的记录特性研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(8): 748~750
- 9 Liu Xuezhong, Chen Zhongyu. Photopolymer holographic recording material sensitized to two wavelength[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009~1102 (in Chinese)  
刘学璋,陈仲裕. 双波长敏感的光致聚合物全息存储材料[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1009~1102