

文章编号: 1004-4213(2011)s1-0011-4

磁流体中微粒运动情况的初步分析

王希军

(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 130031)

摘要: 针对磁流体显示器件的结构特征, 设计了对称双光束激光散斑剪切实验, 着重研究电磁场驱动条件下磁流体中磁微粒的运动状况. 解决了激光散斑剪切干涉实验中磁流体液面影响观察磁微粒运动的问题, 并分析了磁流体液面在电磁场驱动下的变化规律和影响范围. 在此实验基础上, 观察到磁流体的聚集、堆起和碰撞现象, 在电磁场驱动下, 磁微粒表现出周期性运动. 而且, 电磁场中磁微粒带动流体运动, 表现出磁流体显示器件的黑白对比度变化的规律. 尽管研究磁流体中磁微粒运动变化十分复杂, 反过来说明在纳米尺度上激光散斑剪切干涉实验是研究纳米粒子运动的有力手段.

关键词: 激光散斑; 剪切干涉; 磁流体; 磁微粒
中图分类号: O493 **文献标识码:** A

doi: 10.3788/gzxb201140s1.0011

0 引言

激光散斑剪切技术是一种非接触、无损, 实时快速的检测方法, 作为一种干涉测量技术其发展弥补了全息术的一些局限性, 已被广泛应用于无损测量、工业生产、燃烧学、物理学以及医学生物学等领域^[1-2].

激光散斑剪切技术在检测复合材料的层与层之间的情况时, 尤其有效. 利用剪切技术, 缺陷在 1s 内被检测出来. 剪切技术的一个局限就是: 由于这一技术原理是建立在被测表面变化状态上的, 需要对被测物体保证适当的压力增加.

剪切无损检测程序的发展在本质上变成了对被测物体加压的发展. 理想情况下, 压力的增量应该与检测压力相同, 以便检测出对被测物体的使用寿命有危害的缺陷, 同时却忽略对结构整体性无影响的缺陷. 在橡胶产业领域, 剪切技术已被广泛用来检测轮胎的剥离以及其他的一些缺陷. 激光散斑剪切技术的应用还体现在: 缺陷特征的检测^[3-4], 三维形状的测量, 利用双波长法^[5]、双光源及双折射法^[6-7] 进行测量、密封检测^[8] 以及气体泄漏的检测.

但是, 利用激光散斑技术对 100 nm 及 100 nm 以下的微粒及微粒族的运动形态的研究未见报道, 因此, 本论文利用激光散斑技术开展对该尺度的磁微粒族运动形态的研究具有特别重要的意义.

1 对称剪切双光束光路的设计

激光器发出的激光经扩束准直后成为一束宽截

面的平行光, 再通过分束器得到反射平行光束和透射平行光束; 让这两束平行光产生交叠, 即可出现干涉条纹, 如图 1.

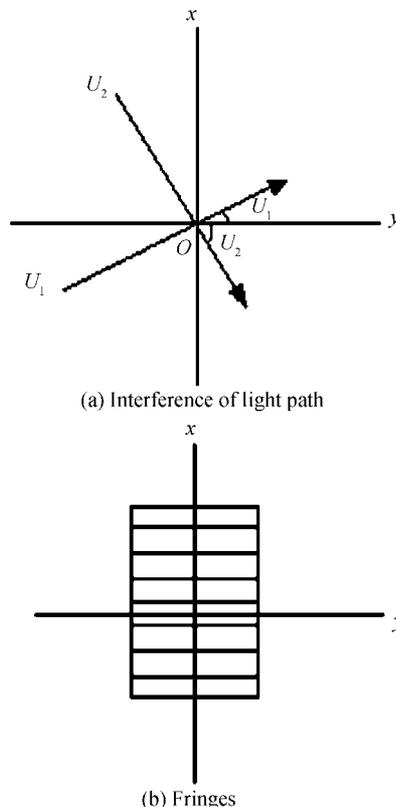


图 1 两束平行光的干涉及其条纹
Fig. 1 Interference of parallel beams and their fringes

设其中一束 U_1 波传播方向为 θ_1 (向上), 另一束波传播方向为 θ_2 (向下), 则其波前函数分别为^[9-11]

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60748026)和国家自然科学基金委中韩合作研究项目(No. 60611140400)资助
第一作者: 王希军(1963-), 男, 博导, 博士后, 主要研究方向为有机光电功能材料及固体激光技术. Email: xjwang@ciomp.ac.cn
收稿日期: 2011-11-17; 修回日期: 2011-11-24

$$\begin{aligned}\tilde{U}_1(x, y) &= A_1 e^{i(k\sin\theta_1 - \varphi_{10})}, \\ \tilde{U}_2(x, y) &= A_2 e^{i(-k\sin\theta_2 - \varphi_{20})}\end{aligned}\quad (1)$$

交叠场中干涉强度分布为

$$I(x, y) = I_0(1 + \gamma\cos\delta(x, y)) \quad (2)$$

对比度值决定于两束光的振幅比和偏振结构,但它不影响纹的形状和间距,后者取决于相位差函数

$$\begin{aligned}\delta(x, y) &= \varphi_1(x) - \varphi_2(x) = \\ &k(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)x - (\varphi_{10} - \varphi_{20})\end{aligned}\quad (3)$$

可见,相位差分布与 y 无关,这意味着两束平行光的干涉条纹是严格地平行于 y 轴的直条纹.再令位相差改变 2π ,即

$$\Delta\delta = 2\pi, \text{ 即 } k(\sin\theta_1 + \sin\theta_2)\Delta x = 2\pi$$

得到条纹间距公式为

$$\Delta x = \frac{\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2} \quad (4)$$

可见,两束平行光夹角越小,则条纹间距越大;两束平行光夹角越大,则条纹间距越小,条纹显得越密.

由于采用的是对称光路,两束光的入射角相同,即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$; 两束光的初位相相同并设其为 0, 即 $\varphi_{10} = \varphi_{20} = 0$; 所以,式(1)~(4)分别简化为

$$\tilde{U}_1(x, y) = Ae^{ik\sin\theta}, \tilde{U}_2(x, y) = Ae^{-ik\sin\theta} \quad (5)$$

$$I(x, y) = I_0(1 + \gamma\cos\delta(x, y)) \quad (6)$$

$$\delta(x, y) = 2k\sin\theta \cdot x \quad (7)$$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (8)$$

2 磁流体器件的结构及原理

2.1 物理结构

磁流体显示器件是在 Al_2O_3 衬底上利用磁薄膜感应技术制造处理后得到的.具体过程如下:首先,溅射沉积一层 $0.5\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 绝缘层 I,然后,沉积 $2.0\ \mu\text{m}$ 的金属 Cu 层和 $0.3\ \mu\text{m}$ 的第二层 Al_2O_3 绝缘层,在其上蒸镀 $3.5\ \mu\text{m}$ 的 NiFe 层及 $3.5\ \mu\text{m}$ 的紫外截止绝缘层(UV-C PR),最后再覆盖 $2.5\ \mu\text{m}$ 的金属 Cu 层 II, $4.5\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 绝缘层 III, 第二层 NiFe ($3.5\ \mu\text{m}$), 第四层绝缘层 IV (Al_2O_3 ; $0.5\ \mu\text{m}$), 如图 2.

铜电极和透磁合金防护层利用光刻胶平板照相电镀术成型.线圈包覆绝缘层是由紫外光阻材料制成的,为使器件电绝缘和表面不被腐蚀,器件被一层铝薄膜钝化.最后, $5.0\ \mu\text{m}$ 的金电极焊点用于连接金属导线.显示器件由 16 圈 $5\ \mu\text{m}$ 宽、间隙为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的金属线构成驱动电场,磁间隙为 $10\ \mu\text{m}$.

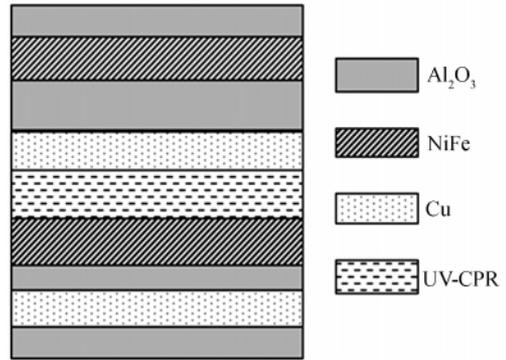


图 2 磁流体器件结构

Fig. 2 Structure magnetic fluid device

2.2 工作原理

磁流体显示器件的工作原理:通过器件微单元表面的亮暗状态来表达信息,器件的亮暗状态由其表面的磁流体薄膜的厚薄决定,膜的厚度通过加在上面的非均匀磁场来调节,磁场的大小由微单元两电极上的电流决定.

光显示磁流体器件的基本结构包括:绝缘衬底、刻蚀凹槽及电极,图 3 为磁流体显示器件的照片.图中有两个显示微单元,每个微单元的大小约为 $1.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$.

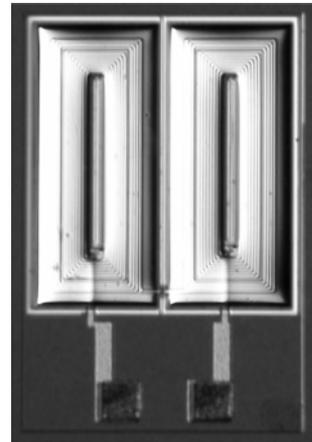


图 3 磁流体显示器件

Fig. 3 Display of magnetic fluid device

图 4 是磁流体显示器件的工作原理.图 4(a)、(b)分别为通电前后磁流体显示器件微单元的表面状态.通电前,磁微粒充满凹槽,且在平台上均匀分布,当入射光照在平台上时,由于磁流体膜层较薄,对入射光的吸收较少,器件为亮状态.通电后,平台两边凹槽内的磁微粒在磁场的作用下沿着凹槽壁爬上平台且堆积为一小山包形状,这时,照在平台上的入射光大部分被磁流体吸收,器件变为暗状态.断电后,在磁流体表面张力的作用下,平台上的磁微粒又流回两边的凹槽内变为图 4(a)的亮状态.

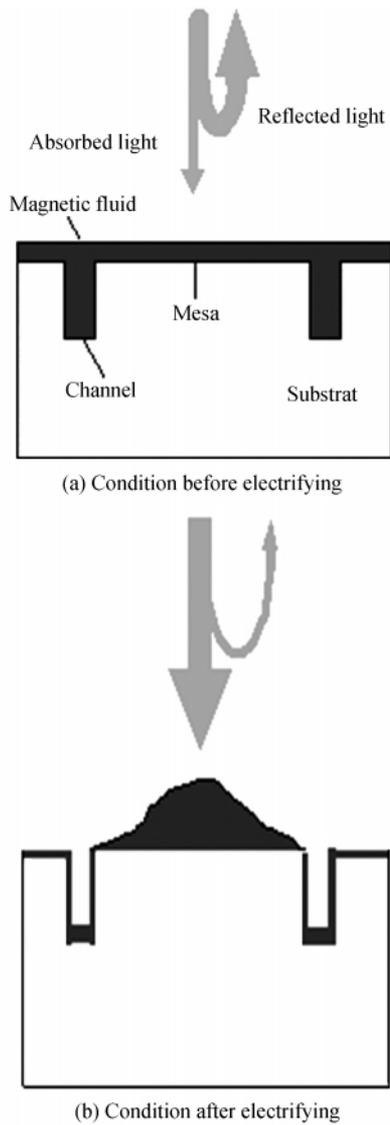


图4 磁流体器件工作原理
Fig. 4 Working principle of magnetic fluid device

3 实验设计及测量

利用图5获得的图像,分析了磁流体液面对用散斑表征磁微粒运动情况的影响。

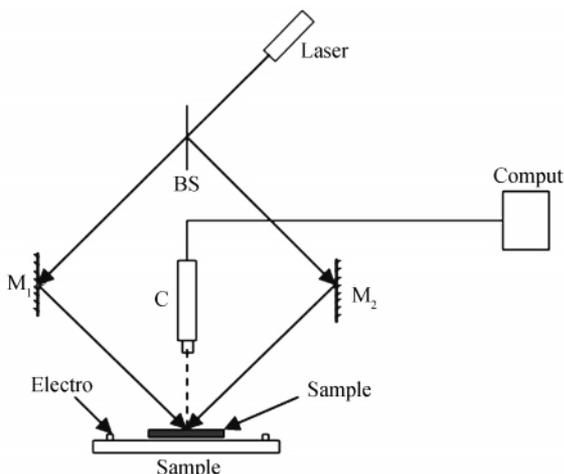


图5 实验原理图
Fig. 5 Principle of experience

3.1 磁流体液面的测量

利用 WYKO 非接触式轮廓仪 (型号: RST-PLUS),对磁流体器件通电前后两个状态的液面轮廓进行了检测. 仪器的工作波长为 650 nm. 图6是显示器件表面磁流体膜的 WYKO 测试图,其中图6(a)、(b)分别是通电前后磁流体薄膜的表面轮廓。

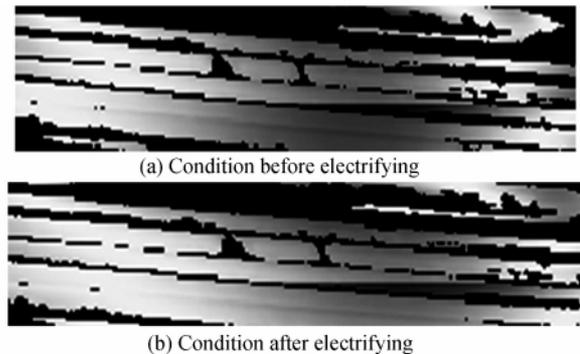


图6 显示器件表面磁流体测试图
Fig. 6 Testing picture of magnetic fluid

由图6可以看出,通电前,磁流体薄膜表面比较平坦,只有个别区域有隆起现象,这可能由于器件水平度不够的缘故. 通电后薄膜表面的起伏变大,其中,均方根粗糙度 R_q 由 188.19 nm 变为 189.61 nm,这说明通电前后液面形貌有所变化,但变化不大,仅为测试波长的百分之一左右. 可见,液面的反射光对形成的散斑运动变化有一定影响,但不起决定作用。

3.2 磁流体中微粒运动状况的测量

在研究磁流体器件在显示过程中磁微粒的动态变化时,工作参数如下:驱动脉宽:100 ms,占空比:1:2;拍摄速率:25 fps.

从 CCD 记录的图像中连续抽取 18 幅,相邻两幅的时间间隔为 40 ms. 然后利用小波进行降噪处理后,再利用概率论中的相关理论,得到磁微粒在 x 方向的微粒,所得描述磁微粒运动情况的曲线见图7。

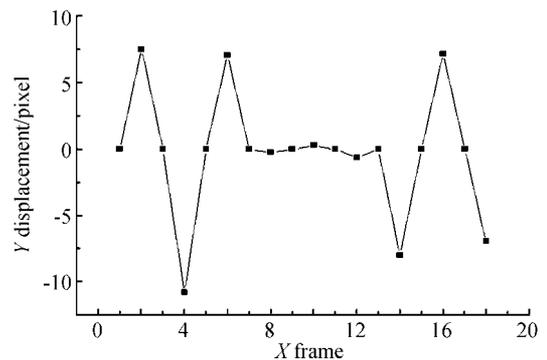


图7 磁微粒运动的描述
Fig. 7 Movement of particles of magnetic fluid

从图7可以看出,磁流体显示器件在工作时,磁微粒做周期性运动。

4 结论

通过设计对称双光束激光散斑剪切干涉实验,克服了磁流体液面对观察磁微粒运动的影响,从而保证了剪切干涉实验的测量精度。

磁流体显示器件中的磁流体在磁场作用下,沿 x 方向运动堆积,由于磁场变化的非线性和微粒间的碰撞团聚等复杂因素的影响,其磁微粒族的运动过程不是匀速运动,带有一定的周期性运动特征。

断电后,磁微粒族在表面张力的作用下,又向初始位置作反向运动。

因此,通过激光散斑剪切干涉实验,观察到磁微粒的聚集,和典型的周期性运动行为。初步分析表明,在电磁场作用下,磁微粒带动流体运动,表现出磁流体显示器件的黑白对比度变化的规律,严格的分析有赖于进一步对流体中磁微粒行为的精确描述。

参考文献

- [1] ZHAO S, CHUNG P S. Digital speckle shearing interferometer using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(10):105606.
- [2] WANG W, YOKOZEKI T, ISHIJIMA R, *et al.* Optical vortex metrology for nanometric speckle displacement measurement [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(1):120-127.
- [3] HUNG Y Y, GRIFFEN C T, CHEN F. High speed shearography for measuring transient deformation and

vibration[C]. Proceedings of the VIII International Congress on Experimental Mechanicals, Nashville, Tennessee, 1996: 206-207.

- [4] SHANG H M., TOH S L, CHAU F S, *et al.* Locating and sizing disbands in glassfibre-reinforced plastic plates using shearography [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1991, **113**(1):99-103.
- [5] SHANG H M, THAM L M, CHAU F S. Shearographic and holographic assessment of defective laminates with bond-lines of different elasticities[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1995, **117**(3):322-329.
- [6] HUANG J R, FORD H D, TATAM R P. Slope measurement by two-wavelength electronic shearography[J]. *Optical Lasers and Engineering*, 1997, **27**(3):321-333.
- [7] TAY C J, CHAU F S, SHANG H M, *et al.* The measurement of slope using shearography[J]. *Optical Lasers and Engineering*, 1991, **14**(1):13-24.
- [8] TAY C J, SHANG H M, POO A N, *et al.* On the determination of slope by shearography[J]. *Optical Lasers and Engineering*, 1994, **20**(3):207-217.
- [9] SEO J W, WANG X J. Magnetic-fluid microelectromechanical light modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(5):542-547.
- [10] SEO J W, PARK S J. An experimental study of light modulator using magnetic fluid for display applications[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, **192**: 499-504.
- [11] SEO J W, JEON S M, PARK S J, *et al.* An experimental and numerical investigation of . at panel display cell using magnetic fluid [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, **252**: 353-355.

Experimental Study on the Movement of Magnetic Granular in the Fluid

WANG Xi-jun

(National Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Since there is the importance of the magnetic granular movement in the magnetic fluid that is to be constructed the magnetic fluid display device, the Laser Speckle Shearing Technology (LSST) was considered to design a double beams speckle interference experiment, and the movement situation of the magnetic granular driven by a electromagnetic field was studied potentially. The influence of the fluid surface on the speckle patterns in the experiment was scaled and analyzed to overcome in the double beams speckle interference system. Then the phenomena of the gathering, piling up and collision and the periodic movement of the magnetic granular driven by electromagnetic field were observed. Therefore, the black and white contrast regular changing in the magnetic fluid display device was showed, basing on the magnetic granular bringing about the fluid movement. Although the complicated movement varied in the magnetic granular in the fluid, there was a explain that LSST was a power tool in nanometer to research the nano-particles.

Key words: Laser speckle; Shearing interference; Magnetic fluid; Magnetic granular