

文章编号:1002-2082(2007)04-0483-05

物光的偏振性对全息记录质量的影响

刘小平, 李栋宇, 张志友, 张正贺, 邓焕林

(湛江师范学院 物理系, 广东 湛江 524048)

摘要: 通过对菲涅耳三维漫反射全息记录光路中物光与参考光偏振状态的实验检测,发现线偏振的激光被不同表面材料的物体散射和漫反射后变成“部分偏振光”,几乎所有目标物都有显著的消偏振现象,全息干板上实际记录的是线偏振的参考光与“部分偏振”的物光形成的相干度较低的干涉条纹。物光偏振度的大幅度下降影响干涉条纹的衬比度,并增加全息图的噪声。给出实验方案和检测光路,采用在参考光路中插入 $1/4$ 波片的方法,可充分利用非偏振物光各个振动方向的光能,提高条纹的衬比度。

关键词: 全息图;部分偏振光;非定域条纹; $1/4$ 波片

中图分类号: TN205

文献标志码: A

Influence of polarization of object light on quality of holographic record

LIU Xiao-ping, LI Dong-yu, ZHANG Zhi-you, ZHANG Zheng-he, DENG Huan-lin
(Department of Physics, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang 524048, China)

Abstract: By investigating the polarization states of object light and reference light in Fresnel hologram, It is found that the linearly polarized laser becomes “partially polarized light” after it is scattered and diffusely reflected by the objects with different material surfaces. Almost all the targets have obvious depolarization phenomenon, and the coherence degree of interference fringes formed by the linearly polarized reference light and “partially polarized object light”, which is actually recorded on the holographic plate, are lower. The great decrease of object-light polarization degree influences the contrast of interference fringes and the noise of hologram. An experiment scheme and testing beam path are presented in this paper. A $1/4$ wave plate was inserted into the reference beam path to make full use of the luminous energy of nonpolarized object light to enhance the contrast of fringes, eliminate the polarization effect of object surfaces and improve the quality of holographic record.

Key words: hologram; partially polarized light; non-localized fringe; $1/4$ wave plate

引言

全息记录是以双光束干涉为基础的,全息图的记录质量、信噪比、衍射效率等是全息技术中的关键因素。用带有布儒斯特窗的单模激光器输出的激

光做光源时,全息图记录的是时空相干性良好的2束线偏振光的干涉条纹,这早已是传统全息理论界所公认的事实^[1]。在实际拍摄物体的全息图时,由于受到光学器件、物体表面的反射(或透射)、散射、

收稿日期:2005-12-30; 修回日期:2006-10-28

作者简介:刘小平(1958—),女,甘肃天水人,湛江师范学院副教授,主要从事光学干涉测量、全息显示方面的研究。E-mail: xpxpliu@sina.com

衍射和不同记录材料、化学处理工艺等多种因素的影响,全息图难以达到良好的品质。目前偏振全息图拍摄质量的研究比较活跃^[2-4],文献^[2]用散射光场的统计特性从理论上分析了物表面消偏振效应对几种不同计量条纹的影响程度,忽略了在全息图记录过程中对干涉条纹衬度的影响。文献^[3]讨论的是体全息图的偏振特性。目前用实验检测物表面消偏振效应对全息记录质量影响的研究较少。

本文从检测目标物在主反射光方向的偏振状态入手,考查漫反射、散射等因素对物光偏振性的破坏,进而研究物光的偏振性对全息记录质量的影响。实验以三维菲涅耳全息照相光路为基础,在物光路和参考光路中插入适当的偏振元件,拍摄经物体散射后“部分偏振”的物光与不同偏振态的参考光相干的全息图,并通过笔者设计的实验方案检验上述几种全息图的质量。实验结果表明,不同偏振态光的全息图质量差异显著。这种差别肯定了改进后的光路能变弊为利,为提高其他类型全息图拍摄质量提供了可行性参考。

1 物光偏振性的检测

全息显示术中一切物品都可成为目标物,通常希望全息显示术中参考光和物光均为振动方向相互平行的线偏振光,这样会得到高衬比度的干涉条纹。实际上由于目标物表面起伏、粗糙程度以及材料的不同,其散射和漫反射光有退偏振效应^[4-5]。为了考查不同材料物体表面漫反射后物光的消偏振情况,我们设计的检测光路如图1所示。图中激光的振动方向垂直于激光器底座,L是扩束镜,B是载物台,P为偏振片,A为光电检流计。依次在载

物台的同一处放置不同表面的待测物体,并在物体的菲涅耳衍射区检测漫反射光的偏振性,即转动偏振片,测出光强的最大、最小值及其方位,然后计算漫反射物光的偏振度。

实验发现带有布儒斯特窗的单模He-Ne激光器输出激光的偏振度为100%,其他物体漫反射光的偏振度差异显著。平面镜反射光的偏振度几乎没有改变,定向漫反射自相干耀眼光斑也是线偏振光。毛玻璃屏反射和透射光的偏振度随其颗粒的粗细有微小变化,但仍能保持较高的偏振性,其他材料表面漫反射光的偏振度见表1。文献^[2]指出消偏振的物表面散射光为部分偏振光,文献^[5]指出散射光的偏振度随散射物颗粒直径和散射角的变化

表1 漫反射物光的偏振度

Table 1 The polarization degree of diffusely reflected object light

目标物	偏振度/%
毛玻璃面	96
人体皮肤	12
有机玻璃制品	17
塑胶制品	19
金属制品	20
瓷制品	18

而不同。对于漫反射光,因为上述研究对象包含非电介质不透明材料,涉及到的理论比较复杂,可用菲涅耳公式做出解释。用 r_p 表示偏振方向平行入射面P分量的反射率, r_s 表示垂直入射面S分量的反射率,则有关系式^[6]

$$r_p = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \tag{1}$$

$$r_s = \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \tag{2}$$

式中 θ_1 和 θ_2 分别为入射角和折射角。对于入射光振幅为1的线偏振光,有

$$\tan \alpha_i = \frac{r_p}{r_s} \tan \alpha \tag{3}$$

式中: α 是入射光偏振方向与入射面法线的夹角; α_i 是反射光振动方向与法线的夹角。从以上公式可以看出,线偏振光入射到2种介质表面时,反射光的偏振面随着入射角的大小而改变。由式(3)可知, α_i 随入射方位角 α 的变化而变化。

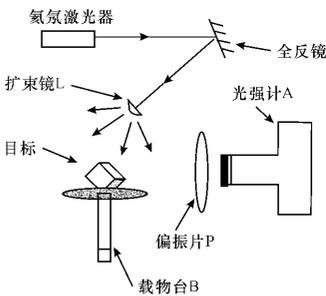


图1 漫反射物光偏振度测量光路

Fig. 1 Beam path of measurement for polarization degree of diffusely reflected light

反射光P分量和S分量的位相也随入射角的大小而改变,表现为入射角在起偏角两侧时反射光发生半波跃变。此外,反射点的几何位置分布也影响反射光的位相。光强计所在位置处物光的主要成分是慢变的低空频成分,可将它视为一个弱的杂散光,也可将漫反射物体表面视为由大量微小的、法线在空间无规则取向的面元组成,且振动方向在空间近似等概率分布。由于位相与空间随机的漫反射光和定向反射的线偏振光混合在一起,再加上散射、衍射、内反射等物理过程对线偏振光的退偏振效应,目标物引起的消偏振现象比较显著。本文称这种光为“部分偏振光”。

2 实验光路及结果检验

拍摄全息图时,激光束经过分束镜、反射镜和扩束镜后,投射到干板上的参考光几乎仍为原振动方向的线偏振光。物光被目标物漫反射、散射后,到达干板上的是振动方向在空间均匀分布的部分偏振光(取光强为最大值的振动分量与入射激光的振动方向相同,并垂直于全息台面)。实验选取偏振度约为17%的有机玻璃工艺品作为目标物。

2.1 物光全部振动分量的记录

综上所述,为了利用物光的全部振动分量并实现相干记录,在菲涅耳三维全息照相实验的参考光路中加入工作波长为589.3 nm的1/4波片,使波长为632.8 nm的参考光变为长短半轴相差不大的椭圆偏振光,如图2所示。调整波片的光轴方向使椭圆偏振光的长轴与物光的极大方向一致,并在干板H上得到高衬比度的干涉条纹(干板标记为(a))。

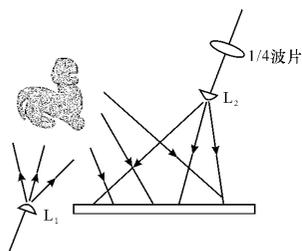


图2 参考光路中加入1/4波片

Fig. 2 The reference beam path in which a 1/4 wave plate is inserted

2.2 物光水平振动分量的记录

以拍摄(a)片的光路为基础,在目标物与干板

间插入口径适当的偏振片,旋转偏振片的方向使出射光强取极小值,此时偏振片出射光的振动方向与全息台面平行。为了记录这个与入射激光振动方向垂直的分量,再在参考光路中将1/4波片换成1/2波片,并调整波片的光轴方向,使出射的线偏振参考光振动方向旋转90°,即与干板上物参考光振动方向相同,并拍摄全息图。这时干板上记录了物光水平分量的干涉效果,此时的干板标记为(c)。为了便于比较,还拍摄了原光路撤去所有偏振元件的菲涅耳全息图,此处干板标记为(b)。若考虑干板上物光的信息不致被太强的参考光湮没,则在3次拍摄中将物参考光强比取为1:1.2左右,并分别检测干板上的光强以调整曝光时间,使每次拍摄的曝光量大致相等。

2.3 结果检验

为了对比全息图的衍射效率,将上述3张银盐干板用常规方法一起冲洗后,放到重铬酸钾漂白液中进行漂白,然后将干板上干涉条纹透射率的分布转变为透明介质厚度的变化,即转化成位相型全息图。对上述3张干板进行拍摄时,插入的偏振元件只改变了相干光的振动方向,而未改变物参考光的光程差在干板上的分布,因此干板上记录的所有干涉条纹的走向和疏密基本相同。为了揭示3张全息片中振动方向不同引起的干涉条纹衬比度的差异,激光平板膜干涉光路^[6](见图3所示)中观察干板前后2表面反射光的非定域条纹。全息干板的药膜面向入射的激光束,光屏上开有小孔使汇聚的细光束通过,干涉条纹呈现在光屏上,可直接用眼睛观察。干涉照片如图4所示。

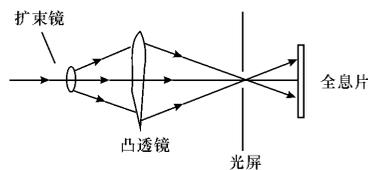


图3 激光干涉仪光路

Fig. 3 The beam path of a laser interferometer

由薄膜非定域条纹的特点^[7]可知,当其他实验条件和观察角度一定时,干涉环整体的疏密程度与膜的厚度有关。拍摄、处理上述3张全息片时,提供的物理、化学条件皆相同,故认为药膜的平均表观厚度大致接近,只是厚度的空间变化率有差别。膜厚改变越迅速,干涉条纹越密集。

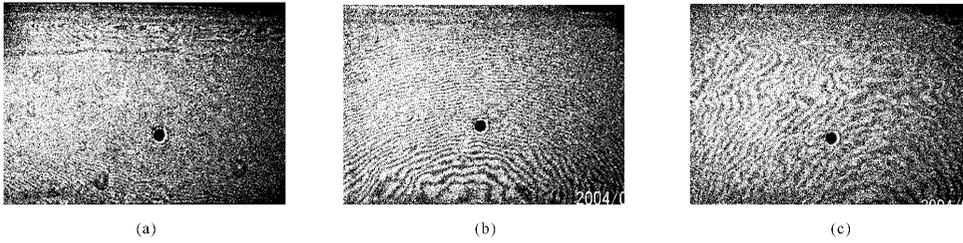


图4 全息片的非定域条纹

Fig. 4 The non-localized fringes on the holograms

以上(a)、(b)和(c)3张干板中,膜厚度的变化依赖于干板透射率的变化,透射率的变化则直接反映拍摄全息图时物光与参考光的相干程度。相干成分越多,背景光越弱,在相同曝光量下条纹极大和极小的差别越显著,亦即透射率改变愈迅速。也就是说,在检测光路中得到的非定域条纹越密。检测实验结果印证了这种推断,干板上诸点的干涉情况仅与物参考光的几何路程分布有关。当记录光路确定后,各点的光程差随之确定,干涉条纹的位置形状与光的振动方向无关。条纹衬比度理论^[8]为

$$\gamma = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m} \quad (0 \leq \gamma \leq 1)$$

式中 I_M 和 I_m 分别表示干涉场中实际观测到的光强极大值和极小值。考虑到全息记录时条纹极小值不可能为零,则由上式可知,条纹衬比度的高低取决于干板上光强的极大值与极小值之差,差值越大,衬比度越高,干涉质量越好。拍摄(b)片时光路中没有使用任何偏振元件,部分偏振的物光中只有振动方向与线偏振参考光相平行的物光分量相干,还有接近光能量一半的物光垂直分量没有发生干涉,只是均匀照射干板,并且干涉条纹叠加在另一半非相干光噪声的背景上,光强极小值较大,衬比度较低。在参考光路中加入 $1/4$ 波片拍(a)片时,记录的物参考光分别为部分偏光和椭圆偏光,其振动方向在垂直传播方向的平面上有相似的分布,同振动方向分量发生相干,使干涉场光强极小值无明显增加而极大值增加近1倍,条纹衬比度显著提高。条纹衬比度高导致漂白处理后药膜厚度的空间变化率也随之增大,因此得到的非定域条纹(图4)整体(a)片最为细密。而(c)片虽然也是2束相互平行的线偏振光干涉,但记录的是物光中振动方向与(a)片相垂直的较小的振幅分量,加之参考光经过的 $1/2$

波片的工作波长不是632 nm,使出射光不是完全线偏振光,还应含有少许椭圆偏光成分,从而导致实际能参与相干的光最弱,因此在检测光路中(c)片的非定域条纹最为稀疏。

另外,我们在原菲涅耳三维全息照相参考光路中观察了上述3张全息图的再现像品质,无论像的亮度、清晰程度还是衍射效率,都表明(a)片最佳,(b)片次之,(c)片较差。此结论与图4所给出的全息片的非定域条纹预期的结果相一致。

3 结论

偏振元件在全息照相中起着重要的作用。由于大多数目标物被线偏振的激光照明后,其散射光、漫反射光是偏振度较低的“部分偏振光”,因此物体表面反射光的振动方向分布接近自然光,粗糙物体漫反光的2个相互垂直的振动分量同时存在且相差不大,低偏振度的物光与线偏振参考光产生干涉,使全息图的记录质量显著下降。图4中有效记录目标物的(c)片再次印证了漫反射、散射后的物光中增加了水平振动成分,利用这个分量比消除它更加有利。在参考光路中加入 $1/4$ 波片可以将物光的退偏振效应变弊为利,且效果明显。由此可以得出:在各种全息记录场合,可以针对不同工作目标,在物光、参考光路中插入相应偏振元件能有效提高全息记录的质量。

参考文献:

[1] 于美文. 光学全息及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
 YU Mei-wen. Optical holography and its applications[M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 1996. (in Chinese)

- [2] 方强. 物表面消偏振效应对全息干涉计量的影响[J]. 光子学报, 1994, 23(5): 402-405.
FANG Qiang. Effect of depolarization property of object surface to holographic interferometry [J]. Acta Photonica Sinica, 1994, 23(5): 402-405. (in Chinese)
- [3] 路烁, 刘文耀, 张以谟, 等. 体积全息图的偏振特性[J]. 光电子·激光, 2001, 12(2): 193-196.
LU Shuo, LIU Wen-yao, ZHANG Yi-mo, et al. Polarization characters of volume hologram [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(2): 193-196. (in Chinese)
- [4] 吕晓旭, 张以谟, 马淑贞, 等. 偏振元件在散射物体全息拍摄中的应用[J]. 激光杂志, 2002, 23(4): 43-44.
Lǚ Xiao-xu, ZHANG Yi-mo, MA Shu-zhen, et al. Improving of the recording quality scattering object hologram of by use of polarization element [J]. Laser Journal, 2002, 23(4): 43-44. (in Chinese)
- [5] 叶伏秋. 群体粒子散射光偏振性的研究[J]. 应用光学, 2004, 25(2): 22-24.
YE Fu-qi. The study of polarization of scattering light of particle group [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(2): 22-24. (in Chinese)
- [6] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
ZHONG Xi-hua. Modern foundations of optics[M]. Beijing: Press of Beijing University, 2003. (in Chinese)
- [7] 母国光, 战元令. 光学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
MU Guo-guang, ZHAN Yuan-ling. Optics [M]. Beijing: Press of Peoples Education, 1978. (in Chinese)
- [8] 刘小平. 厚膜分振幅干涉的非定域条纹[J]. 四川师范学院学报, 1995, 16(1): 72-75.
LIU Xiao-ping. The non-localized fringes of separate amplitude beam interference through a thick film [J]. Journal of Sichuan Teachers College, 1995, 16(1): 72-75. (in Chinese)
- [9] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
ZHONG Xi-hua. Modern foundations of optics[M]. Beijing: Press of Beijing University, 2003. (in Chinese)

(上接第 471 页)

- WANG Zhi-qi. The new advance and development of femto-second laser technology [J]. Journal of Applied Optics, 1999, 20(1): 17-19. (in Chinese)
- [2] 江志明, 徐至展. 超短高功率脉冲激光与物质相互作用及其应用[J]. 中国激光, 1996, 23(6): 513-519.
JIANG Zhi-ming, XU Zhi-zhan. Intense ultrafast laser-matter interaction and its application [J]. Chinese Journal of Laser, 1996, 23(6): 513-519. (in Chinese)
- [3] XU Z Z, YANG X D. 5.4 TW/46 fs 10 Hz Ti : sapphire laser system [J]. Science in China. 2000, 43(5): 533-538.
- [4] YUSUKE T. Second-harmonic Generation from Intense, 100 fs Ti: sapphire laser pulses in potassium dihydrogen phosphate, cesium lithium borate and β -barium metaborate [J]. Jpn. J. Appl. phys., 1998, 37: 4801-4805.
- [5] ILDAR A B. Limitation of second-harmonic generation of femtosecond Ti : sapphire laser pulses [J]. J. Opt. Soc. Am. , B, 2004, 21(2): 318-322.
- [6] ZHANG T J, YAMAKAWA K. Numerical analysis of type I third-harmonic generation through third-order and cascaded second-order nonlinear optical processes [J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2000, 39: 91-95.
- [7] LIU H, YAO J Q, PURI A. Second and third harmonic generation in BBO by femtosecond Ti: sapphire laser pulse [J]. Opt. Commun., 1994, 109(15): 139-144.
- [8] DMITRIEV V G, GURZADYAN G G. Handbook of nonlinear optical crystals [M]. Moscow: Armenia, 1995.
- [9] CHIEN C Y, KORN G, COE J S. Highly efficient second-harmonic generation of ultraintense Nd: glass laser pulses [J]. Opt. Lett., 1995, 20(4): 353-355.
- [10] RODRIGUEZ G, TAYLOR A J. Measurement of cross-phase modulation in optical materials through the direct measurement of the optical phase change [J]. Opt. Lett., 1998, 23(11): 858-860.