

体全息成像系统的波长选择成像特性

伍江涛^{1,2} 江竹青^{1,2} 宋 蕾^{1,2} 王羽佳^{1,2} 贾 烨^{1,2} 陶世荃^{1,2}

(¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100124
²北京工业大学微纳信息光子技术研究所, 北京 100124)

摘要 研究基于不同光源照射的体全息光栅成像系统的成像特性。采用波长 532 nm 的相干光, 在 2 mm 厚的掺铁铜铌酸锂晶体中记录体全息光栅, 作为成像系统中的体全息透镜。研究比较成像系统在波长为 532 nm 和 640 nm 的相干光照射下衍射读出的成像特性, 结果表明, 不同波长光照射成像时, 体全息成像系统深度分辨率不同, 红光读出时具有更灵敏的轴向选择性。实验研究对比了单色光源与宽频光源成像特性, 结果表明, 当采用宽频光源读出时将得到更多的关于成像物体的横向信息。

关键词 全息术; 体全息光栅; 布拉格选择性; 宽频光源

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s109004

Wavelength-Selective Imaging in Volume Holographic Imaging Systems

Wu Jiangtao^{1,2} Jiang Zhuqing^{1,2} Song Lei^{1,2} Wang Yujia^{1,2} Jia Ye^{1,2} Tao Shiquan^{1,2}

(¹College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China
²Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract In this paper, imaging characteristics with different light sources based on volume holographic imaging system are researched. The volume holographic lens as imaging lens is recorded in the 2-mm-thick LiNbO₃:Fe:Cu crystal at wavelength of 532 nm. The imaging characteristics of the imaging system are researched at the reading wavelength of 532 nm and 640 nm. The results show that the depth resolution of volume holographic imaging system is different when different reading wavelengths are used. Axial selectivity is more sensitive when the red light is used as the reading light. The imaging features of monochromatic light source and broadband light source are compared. Experimental results show that using broadband light source can obtained more transverses information of the object.

Key words holography; volume holographic imaging; Bragg selectivity; broadband source

OCIS codes 090.7330; 110.1650; 110.3010

1 引 言

传统的照相成像的目的是使一个三维物体投影到一个二维的接收器平面上, 在投影几何学原则上, 使二维图像在几何上相似于原始的三维物体, 在成像过程中, 由于散焦作用, 第三维的深度信息被丢失了^[1]。体全息成像系统是结合体全息透镜的成像系统, 它可以恢复物体的三维信息。体全息透镜是通过记录两束相干光束的三维干涉图样而制成的, 简

单的记录方式为一束平面参考光束和一束平面信号光束在厚的记录介质内相干涉, 在介质中所记录的体全息光栅, 即体全息透镜, 可用作体全息成像系统中的成像透镜^[2~4]。体全息光栅的布拉格选择性和简并特性被用来获得带有三维信息的图像, 和通常的透镜不同, 三维信息意味着物体的像是沿着深度方向一层层获得的, 不同的切片代表着物体不同的深度并成像在 CCD 的不同轴向位置^[5~7]。众所周

收稿日期: 2011-08-06; **收到修改稿日期**: 2011-08-30

基金项目: 北京市教委科研计划项目(KM200910005033)资助课题。

作者简介: 伍江涛(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: wjt_110@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 江竹青(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事光信息处理方面的研究。

E-mail: zhuqiang@bjut.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040130140M)

知,一种波长的光记录的光栅可以用另一种波长的光读出,由于体全息光栅具有高的角度和波长选择性,当再现光的波长和光栅间距被唯一确定,读出光必须偏转一定的角度才能达到其布拉格匹配的位置^[8,9]。在由多种波长构成的白光中,仅有一种波长即与记录光波相同波长的光才能达到衍射极大值,可以极好地避免色串扰现象。当用白光来读出已记录的光栅时,根据布拉格的简并性,可以获得关于物体的更多的横向信息^[10]。本文研究了基于不同光源照射的体全息光栅成像系统的成像特性。

2 体全息透镜的制作

实验记录光路如图 1 所示,此光路为平面参考光体全息(VH)成像系统的记录过程。实验中记录材料是 2 mm 厚的掺铜铁的铌酸锂(LiNbO₃:Fe:Cu)晶体,记录光波长为 532 nm,透镜 L₁ 将平行光聚焦后得到一个点源,经过透镜 L₂ 准直后得到一束平行光,将此束光作为信号光与另一束平行光进行干涉记录制成全息光栅,两束光在晶体内部的夹角 θ 为 12.72°。

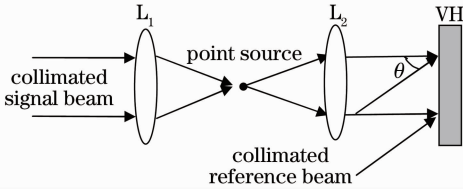


图 1 记录光路

Fig. 1 Schematic diagram of recording

实验读出光路如图 2 所示,在晶体后放置一个透镜 L₃,用于将全息光栅的衍射光束成像在 CCD 探测面上。

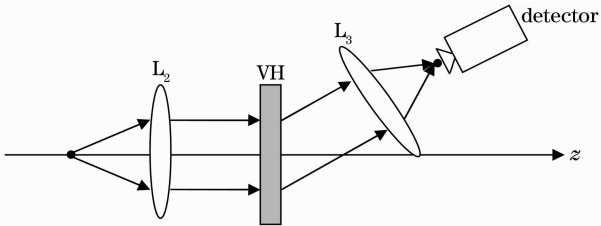


图 2 读出光路

Fig. 2 Schematic diagram of imaging an object

3 单色光源成像特性

3.1 波长匹配成像读出

假设介质内所有光波矢量的模均为 k ,入射光矢量为 k_i ,衍射光矢量为 k_d ,光栅矢量为 K_g ,则它们之间的关系为

$$k_{i1} - k_{d1} = k_{i2} - k_{d2} = K_g, \quad (1)$$

而且

$$|k_{i1}| = |k_{d1}| = \frac{2\pi n}{\lambda_1}, \quad (2)$$

$$|k_{i2}| = |k_{d2}| = \frac{2\pi n}{\lambda_2}, \quad (3)$$

(1)~(3)式中 n 为记录晶体的折射率, λ 为各光波在真空中的波长。如图 3 所示。

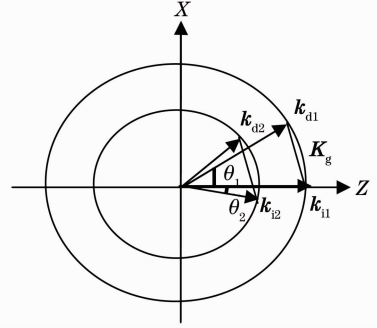


图 3 体光栅的 k 矢量图

Fig. 3 Bragg circle diagram for wavelength degeneracy

在本次实验中,体全息光栅是通过记录两束相关光束的三维干涉图样而制成的,物光垂直记录晶体。记录光波长为 $\lambda_1 = 532$ nm,物光与参考光在晶体内部的夹角为 12.72°。体全息光栅用另一种不同的光读出,读出光波长为 $\lambda_2 = 640$ nm。为得到最大衍射效率,读出光必须相对记录光波的物光入射方向偏转一定的角度才能达到其布拉格匹配位置。下面计算偏转角度的理论值。

由图 3 可知 $\theta_1 = 12.72^\circ$, $|k_{i1}| = |k_{d1}| = \frac{2\pi n}{\lambda_1}$,

$|k_{i2}| = |k_{d2}| = \frac{2\pi n}{\lambda_2}$, 光栅矢量为

$$|K_g| = 2 |k_{i1}| \sin \frac{\theta_1}{2}, \quad (4)$$

$$|K_g| = 2 |k_{i2}| \sin \left(\theta_2 + \frac{\theta_1}{2} \right), \quad (5)$$

计算可得

$$\theta_2 = 1.09^\circ, \quad (6)$$

θ_2 为在晶体内部读出光相对记录光波的物光入射方向偏转的角度。下面计算读出光束在晶体外部的偏转角度 $\Delta\theta$,根据公式

$$\Delta\theta = \arcsin(n \sin \theta_2), \quad (7)$$

计算可得,读出光必须相对记录光波的物光入射方向偏转角度 $\Delta\theta = 2.39^\circ$ 才能达到其布拉格匹配位置。

使读出光从原记录光波的物光入射方向开始发生偏转,每偏转 0.1° 记录一下全息光栅的衍射光功

率。记录下每次偏转所对应的衍射光功率，则衍射光功率最大值所对应的读出光的偏转位置就是其布拉格匹配位置。图4为每次偏转所对应的衍射光功率值的归一化曲线。

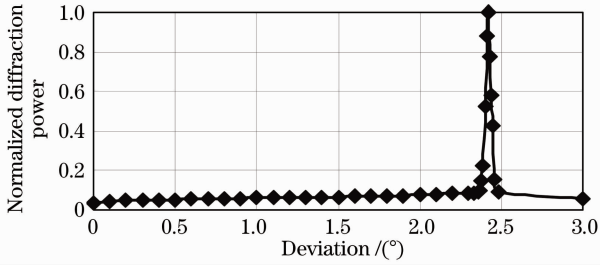


图4 衍射光功率值的归一化曲线

Fig. 4 Variation of the normalized diffraction power with the deviation $\Delta\theta$ in the lateral

根据上述实验结果，得出采用 640 nm 光读出时，其相对记录光波的物光入射方向偏转角度 $\Delta\theta = 2.42^\circ$ 才能达到布拉格匹配位置，这与之前得到的理论值一致。

3.2 不同波长深度分辨率比较

由于体全息光栅衍射的布拉格匹配条件决定了在参考位置附近的入射照明光能够衍射成像、并被探测器检测到，探测器记录得到的衍射场强度分布即是体全息成像系统所形成的图像。当成像探测光偏离参考位置时，由于偏离了布拉格条件，部分输入信息不能通过系统传输，导致像面上的成像信号失真。在体全息成像系统中，可以采用点扩散函数 (PSF) 描述系统的成像失真特性，具体评价成像系统的深度分辨率。

对于实验中的体全息成像系统，对衍射场的点扩散函数归一化得

$$\frac{I_d}{I_o} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^1 d\rho \rho \sin^2 c^2 \left(\frac{aL \sin \theta \phi}{\lambda f^2} \rho \sin \phi \right), \quad (8)$$

则该体全息成像系统的深度分辨率 $\Delta Z_{\text{FWHM}}^{[11]}$ 为

$$\Delta Z_{\text{FWHM}} = \frac{5.34 f^2 \lambda}{a \theta L}, \quad (9)$$

式中 a 为复用全息图的直径， f 为物镜的焦距， L 为记录材料的厚度， θ 为参考光束与物光束的夹角，所有值均为介质内的测量值。将绿光再现时的深度分辨率与红光再现时的深度分辨率比值定义为 T ，即

$$T = \frac{\Delta Z_{\text{FWHM}(G)}}{\Delta Z_{\text{FWHM}(R)}} = \frac{\lambda_G \theta_R}{\theta_G \lambda_R} = 2 \lambda_1 \arcsin \left[\frac{\lambda_2 \sin(\theta_1/2)}{\lambda_1} \right] / (\lambda_2 \theta_1), \quad (10)$$

根据(10)式，可以发现，理论上绿光再现时的深度分辨率总是大于红光再现时的深度分辨率，并且其差异

随着干涉角度的增大而增大。当 $\theta_1 = 19.75^\circ$ 时，经计算，当用绿光再现时深度分辨率 $\Delta Z_{\text{FWHM}} = 3.7 \text{ mm}$ ，当用红光再现时深度分辨率 $\Delta Z_{\text{FWHM}} = 3.2 \text{ mm}$ 。

在实验中，通过控制电动平移台使透镜 L_1 沿 Z 方向移动，则点源会沿 Z 方向产生相应的偏移，由于布拉格失配的影响，衍射光的效率会随点源的移动而减小，用功率计测量透镜 L_3 后功率的变化情况，画出归一化衍射功率随轴向偏移的变化曲线图，定义点扩散函数曲线的半峰全宽 (FWHM) 为成像系统的深度分辨率 ΔZ_{FWHM} 。图5为绿光、红光再现时归一化衍射功率随轴向偏移的关系图。

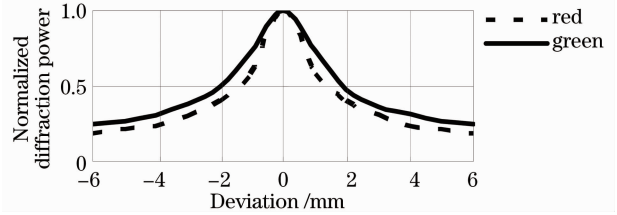


图5 归一化衍射功率随轴向偏移关系图

Fig. 5 Variation of the normalized diffraction power with the deviation in the longitudinal direction

从图5可知，绿光再现时，实际的纵向深度分辨率为 3.9 mm。红光再现时，实际的深度分辨率为 3.2 mm，实验结果与理论分析一致，当用绿光再现时会对体全息光栅有擦除影响，当用红光再现时可以提高轴向成像读出选择性。

4 宽带光源成像特性

对于体全息光栅来说，仅当读出光束的入射角和波长同时满足布拉格条件，才能得到最强的衍射光。若波长或角度稍有偏移，衍射光强将大幅度下降，并迅速降为零。所以体全息光栅具有较高的角度和波长选择性。

根据布拉格光栅的简并性，当采用宽频光源成像时可以得到更多的关于成像物体的横向信息，因此，采用白光来读出已记录的光栅。

在本次实验中，记录材料为 2 mm 厚的掺铜铁的铌酸锂 ($\text{LiNbO}_3 : \text{Fe} : \text{Cu}$) 晶体，记录光波长为 532 nm，点光源为成像物体。记录好的体全息光栅被两种不同的光源读出，第一种为与记录光波长相等的单色光源，其读出位置为原记录光波的物光入射方向。第二种为白光光源，其读出位置同样为原记录光波的物光入射方向。图6为实验中所记录的图像，图6(a)是与记录光波长相等的单色光源所成的像。图6(b)为白光光源所成的像，根据布拉格简

并性,在图中有三个像,最左边为白光光源中的黄光所成的像,中间为绿光所成的像,最右边为蓝光所成的像,其中绿光所成的像最清晰衍射光强最强,因为白光光源中只有绿光与记录光波长相等。由此得出结论,当用宽频光源成像时,可以得到更多的关于成像物体的横向信息。

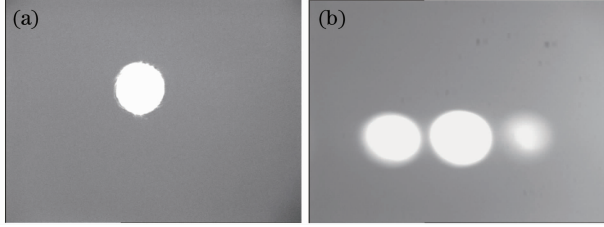


图 6 (a)单色光源成像;(b)宽频光源成像

Fig. 6 Object is illuminated with a monochromatic source (a) and a broadband source (b)

5 结 论

研究了基于不同光源照射的体全息光栅成像系统的成像特性。采用波长 532 nm 的相干光,在 2 mm 厚的掺铁铜铌酸锂晶体中记录体全息光栅,作为成像系统中的体全息透镜。研究比较该成像系统在波长为 532 nm 和 640 nm 的相干光照射下的衍射读出的成像特性,结果表明,不同波长光照射成像时,体全息成像系统深度分辨率不同,红光读出时具有更灵敏的轴向选择性。实验研究对比了单色光源与宽频光源成像特性,结果表明,当采用宽频光源读

出时,可以得到更多的关于成像物体的横向信息。

参 考 文 献

- 1 Arnab Sinha, George Barbastathis. Imaging using volume holograms[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(9): 1959~1972
- 2 D. Gabor. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777~779
- 3 G. Barbastathis, D. J. Brady. Multidimensional tomographic imaging using volume holography [C]. *Proc. IEEE*, 1999, **87**(12): 2098~2120
- 4 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Design of a new type lateral-spread photorefractive volume holographic lens and its diffraction properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1629~1632
闫爱民, 刘立人, 刘德安等. 光横向传播的光折变体全息透镜设计及其衍射性质[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1629~1632
- 5 E. N. Leith, A. Kozma, J. Upatnieks *et al.*. Holographic data storage in three-dimensional media [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(8): 1303~1311
- 6 P. J. van Heerden. Theory of optical information storage in solids [J]. *Appl. Opt.*, 1963, **2**(4): 393~400
- 7 Y. Luo, P. J. Gelsinger, J. K. Barton *et al.*. Optimization of multiplexed holographic gratings in PQ-PMMA for spectral-spatial imaging filters [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(6): 566~569
- 8 Yue Xuefeng. Coupled wave theory for light diffraction from volum hologram grating in photorefractive crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, **8**(8): 727~734
岳雪峰. 光折变晶体中的体全息光栅光衍射的耦合波理论. [J]. *光学学报*, 1988, **8**(8): 727~734
- 9 Laura Waller, Yuan Luo, Se Youngyang *et al.*. Transport of intensity phase imaging in a volume holographic microscope [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2961~2963
- 10 Arnab Sinha, George Barbastathis. Broadband volume holographic imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(27): 5214~5221
- 11 A. Sinha, W. Sun, T. Shih *et al.*. Volume holographic imaging in the transmission geometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(7): 1533~1551

栏目编辑:马 沂