

基于 BSO 晶体的振动测量系统

张 斌 冯其波 由凤玲 高晓婧

(北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 利用光折变晶体材料, 可实现宽带、微小振动测量。测量系统采用零差干涉结构, 使用硅酸铋(BSO)晶体记录信号光与参考光干涉所形成的动态全息, 并实时衍射, 再由光电探测器探测从 BSO 晶体出射的透射信号光与衍射参考光所形成的干涉信号, 从而实现振动的测量。通过对 BSO 晶体中全息记录条件, 包括两光束夹角、光强比, 与衍射效率关系的研究, 确定了最佳记录条件。在参考光路中利用 $1/4$ 波片改变光束偏振态, 使干涉系统在 BSO 晶体不加外电场情况下, 具有较高测量灵敏度。以一定频率驱动的压电陶瓷为被测物体, 在 $0.5 \sim 90$ kHz 的频率范围内所测量到的振动频率与预先加载的频率一致。

关键词 测量; 振动测量; 硅酸铋(BSO)晶体; 动态全息; 零差干涉

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0312003

Vibration Measurement System Based on the Crystal BSO

Zhang Bin Feng Qibo You Fengling Gao Xiaojing

(Key Laboratory for Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A high-frequency micro-vibration measurement system based on the photorefractive crystal is presented. The homodyne interferometer configuration is adopted and the crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) is used to record the dynamic holographic signal formed by the interference of the signal beam and the reference beam. Simultaneously, the diffracted reference beam is generated and interferes on the photodetector with the partial signal beam transmitted directly through the crystal. Time-based signals of photocurrent which is proportional to the vibration displacement are obtained. The factors that affect diffraction efficiency have been investigated such as intensity ratio of the reference beam and the signal beam, the angle between the above two beams. Another quarter-wave plate is used in the reference beam path to improve the measuring sensitivity without electric field on the crystal. A piezoelectric ceramic is used as the target and the detected frequency by this system exactly corresponds to the predetermined frequency from 0.5 kHz to 90 kHz.

Key words measurement; vibration measurement; crystal BSO; dynamic holography; homodyne interferometer

OCIS codes 090.5694; 120.2880; 120.3180

1 引 言

宽带、微小振动测量在工业及科学研究中得到广泛应用, 例如过程控制、机械系统故障诊断、激光超声无损检测、材料结构特性分析和生物医学等方面。多种测振方法及装置被研究和应用^[1~11], 其中迈克耳孙结构、马赫-曾德尔结构的零差或者外差激光干涉测量方法最为典型, 虽然它们也存在如集光率小、易在干涉臂中引入周围环境所引起的缓慢相

位漂移, 以及测量粗糙表面所引起的波前不匹配等问题。

近年来, 基于非线性晶体材料的激光干涉测量方法得到发展^[12,13], 可使用铋硅族晶体, 如硅酸铋(BSO)、锗酸铋(BGO)或者半导体型晶体, 如砷化镓(GaAs)、碲化镉(CdTe)等。这些晶体的光折变特性, 使得此类激光干涉系统具有显著特点。首先由于在晶体中记录动态全息及实时衍射, 使得干涉光

收稿日期: 2011-09-01; **收到修改稿日期**: 2011-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(60878054)和中央高校基本科研业务费专项资金(2009JBZ015)资助课题。

作者简介: 张 斌(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: bzhang@bjtu.edu.cn(中国光学学会会员号: S040111795)

束能够波前匹配,适于测量粗糙表面的振动;其次,由于晶体本身性质决定,干涉测量具有一定的截止频率,使得干涉仪相当于一个高通滤波器,这样,那些由于环境干扰而引起的低频扰动可以被有效地补偿,使得测量稳定。

但是,为提高测量灵敏度,一般需要在晶体上加载较强的外电场^[14],约为 10 kV/cm²。这不但会使得系统复杂,成本增加,晶体也可能由于较大的热量而损坏。本文研究了无外电场下的基于 BSO 晶体的零差干涉测振系统,重点研究了影响动态全息记录及衍射效率的因素,寻求到最佳记录条件。为使不加电场下的系统获得较高测量灵敏度,进行了利用 1/4 波片与偏振片组合引入相位差的实验研究。

2 测量原理

系统的测量原理如图 1 所示。参考光束与被振动物体相位调制的信号光束在晶体内发生干涉,形成动态全息,生成布拉格(Bragg)光栅,两光束均满足 Bragg 条件,其中参考光束在信号光束传播方向被衍射,衍射的参考光束与透射的信号光束在光电探测器上干涉,通过干涉信号处理以解调出振动所引起的相位变化。由于晶体中动态全息的形成以及实时的衍射,使得探测器上两相干光束的波前匹配,适于粗糙表面振动测量。

经过晶体直接透射的信号光可表示为^[15]

$$E_T = \exp\left(-\frac{\alpha d}{2}\right) E_0 \exp[i\varphi(t)], \quad (1)$$

式中 $E_0 \exp[i\varphi(t)]$ 为入射到晶体上的信号光振幅; $\varphi(t)$ 为被测物振动所引入的相位调制,若振动幅度为 $u(t)$,则 $\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} u(t)$; α 为晶体的吸收系数; d 为晶体厚度。

经过晶体所衍射的参考光可表示为

$$E_D = \exp\left(-\frac{\alpha d}{2}\right) E_0 [\exp(\gamma d) - 1], \quad (2)$$

式中 $\gamma = \gamma' + i\gamma''$ 为晶体的光折变增益,实部 γ' 表示信号光与参考光之间的能量转移,虚部 γ'' 表示相位的耦合。

光电探测器上的干涉信号可表示为

$$I = \exp(-\alpha d) I_0 [\exp(2\gamma' d) + 2\exp(\gamma' d) \sin(\gamma'' d) \varphi(t)], \quad (3)$$

当晶体在外加电场作用下,两相干光束相位的耦合近似满足 $\pi/2$,可以获得较大测量灵敏度;而当晶体不加外电场时,其相位耦合则接近 0 或者 π ,将使得

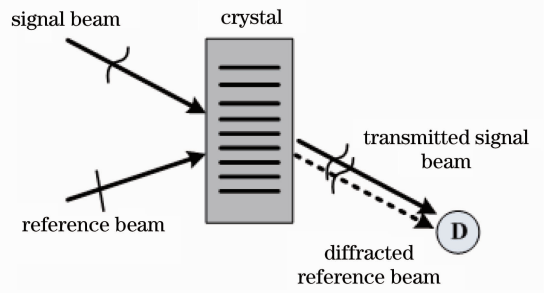


图 1 测量原理

Fig. 1 Principle of measurement

测量灵敏度降低。

3 实验与实验结果

3.1 实验装置

基于 BSO 晶体的激光干涉测振系统实验装置如图 2 所示。光源使用波长 532 nm、功率 150 mW 的单纵模连续固体激光器。光束被分为信号光与参考光两束,并利用 1/2 波片与偏振分光棱镜(PBS)来调整两束光的光强比。信号光经过 1/4 波片,由被测振动物体表面反射,再次通过 1/4 波片,改变偏振状态。信号光与参考光在光折变晶体内干涉,生成动态全息,所使用的晶体为 5 mm × 5 mm × 5 mm、(110)切割的 BSO。通过 BSO 晶体所衍射的参考光与直接透射的信号光在光电探测器上干涉,干涉信号由存储示波器观察并记录,同时利用 NI 数据采集卡及 LabView 编程进行信号采集与处理,解调出振动信息。

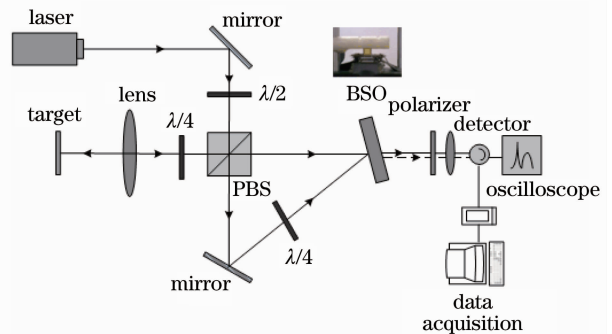


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

BSO 晶体在不加外电场的情况下,所记录的是扩散模式的全息,使得在探测器上两相干光束的相位差为 0 或者为 π ,不满足 $\pi/2$ 的相位差条件,此时,相位解调的灵敏度最低。为了提高灵敏度,在参考光路中使用一块 1/4 波片,并在 BSO 晶体后、探测器前使用一偏振片,由于偏振状态的改变,将引入

相位差,使干涉信号增强,测量灵敏度提高。这种情况下,测量原理部分给出的(3)式需要增加一个修正项 $\delta\varphi$,可近似表示为

$$I = \exp(-\alpha d) I_0 [\exp(2\gamma'd) + 2\exp(\gamma'd) \sin(\gamma''d + \delta\varphi) \varphi(t)], \quad (4)$$

式中 $\delta\varphi$ 即为引入的相位差。

3.2 实验结果

3.2.1 衍射效率

由测量原理可知,为了在探测器上得到较好的干涉信号,必须使得经 BSO 晶体记录全息后有尽可能强的衍射参考光产生,即希望获得更高的衍射效

率。图 3 给出了光电探测器在各种情况下所采集到的光电转换信号:(a)探测器上没有任何光束照射时的信号;(b)当遮挡住参考光束时,只能探测到经 BSO 晶体直接透射出去的信号光;(c)当参考光束不被遮挡时,可观察到放大的光信号,此信号中包含了透射的信号光以及衍射的参考光。图 4 给出了 BSO 晶体上参考光与信号光之间夹角以及两光束光强比对衍射效率的影响,得到最佳全息记录条件为:两光束夹角 32° ,信号光强:5 mW,参考光强 25 mW,此时,探测器上的光信号从 2.6 mW 放大大到了 3.1 mW,放大了 20%。

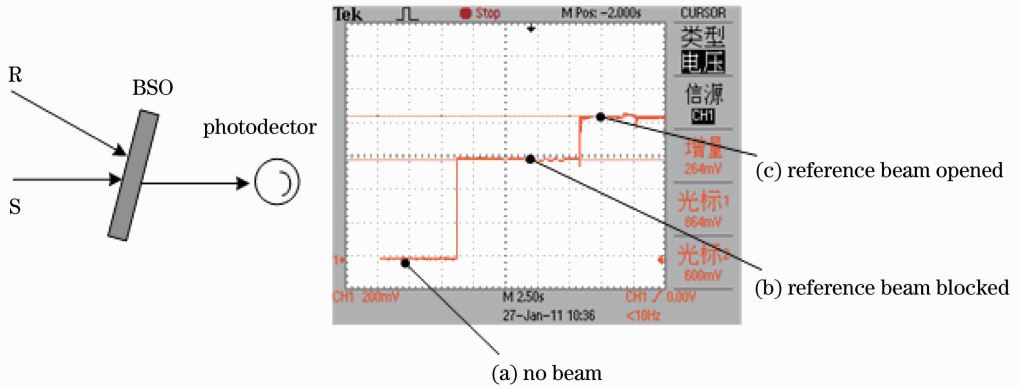


图 3 三种情况下,光电探测器所探测到的信号

Fig. 3 Signals on the photodetector in three different cases

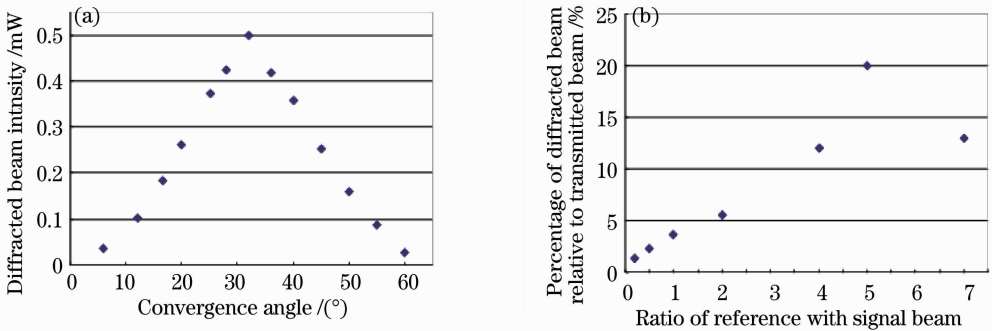


图 4 (a) 衍射效率与光束夹角的关系;(b)衍射效率与参考光、信号光光强比的关系

Fig. 4 (a) Diffraction efficiency versus convergence angle; (b) diffraction efficiency versus ratio of reference-beam intensity with signal-beam intensity

3.2.2 相位差的引入

与外加电场下 BSO 晶体所记录的漂移模式全息不同,在不加外电场的情况下,BSO 晶体所记录的是扩散模式下的动态全息,此时光电探测器上的透射信号光与衍射参考光之间不满足 $\pi/2$ 相位差的条件,所输出的干涉信号弱,测量灵敏度低,如

图 5(a)所示。将一块 $1/4$ 波片插入到参考光路上,如图 5(b)所示,将改变参考光的偏振态从线偏振光到圆偏振光,再经过晶体后的偏振片,重新获得两偏振态相同的光束照射在探测器上并干涉,此时将引入相应的相位差,干涉信号显著增强,如图 5(c)所示。

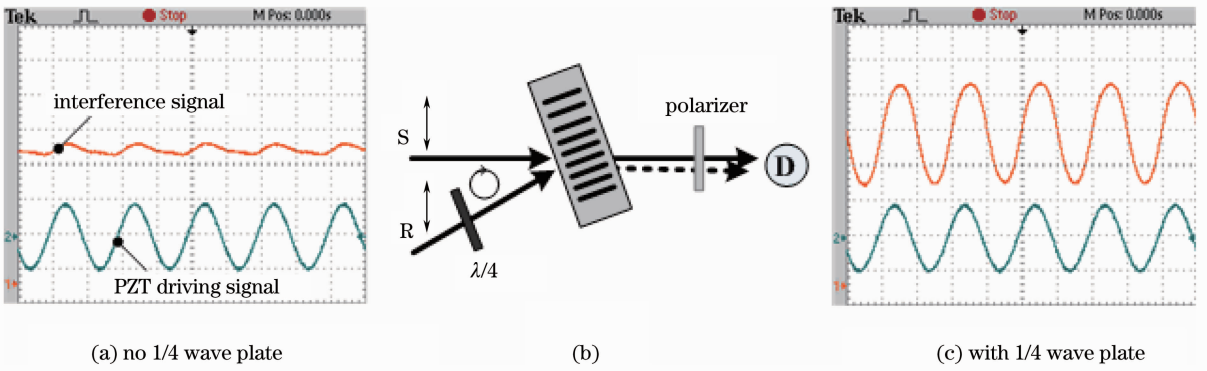


图 5 加入 1/4 波片后干涉信号的变化

Fig. 5 Interference signal changes before and after insertion of the 1/4 wave plate

3.2.3 振动测量

以一定电压、一定频率驱动的压电陶瓷(PZT)作为被测振动物体。在 500 Hz 正弦波驱动下,给压电陶瓷加载 200~1000 mV 的电压,利用德国 Polytec 公司的 PDV100 测振仪与本系统同时进行测量,结果如图 6 所示,两者的测量结果线性相关度达 99%,验证了本测量系统原理的正确性。压电陶瓷在 1 V 电压的驱动下,改变驱动频率在 0.5~90 kHz 之间,对由本测量系统所获得的时域信号进行快速傅里叶变换(FFT),得到相应频域信号,如图 7 所示,可以看出所测量到的振动频率与预先加载的频率完全一致。

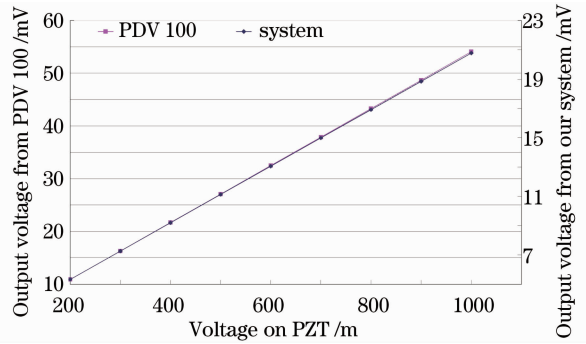


图 6 测量系统与 PDV100 测振仪的测量结果对比
Fig. 6 Comparison of the measurement results by our system and PDV100 vibrometer

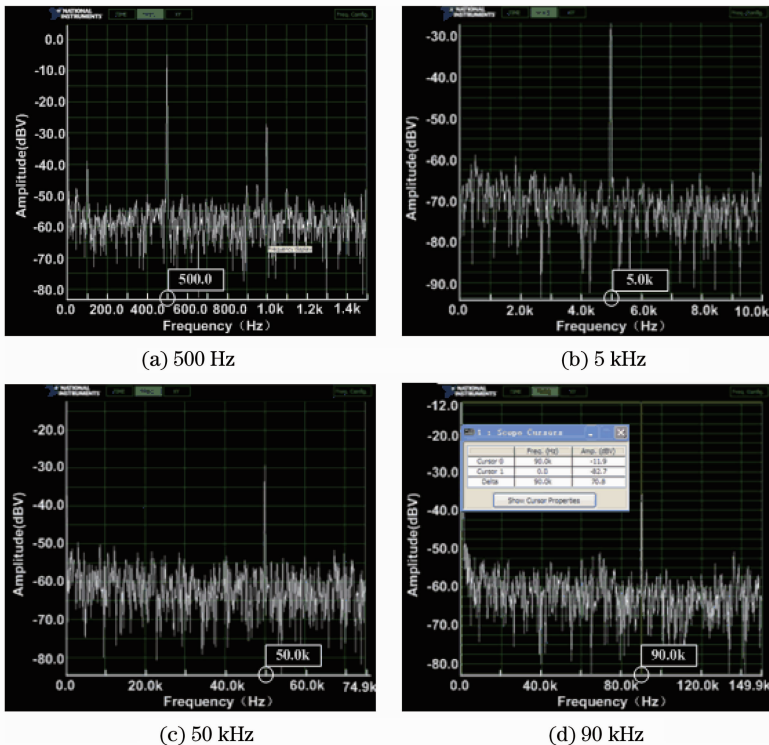


图 7 PZT 在不同频率驱动下得到的测量结果

Fig. 7 Measurement results when PZT is driven with different frequencies

4 结 论

本文研究了一种基于 BSO 晶体,不加外电场情况下的激光零差干涉测振系统。信号光与参考光在 BSO 晶体内干涉形成动态全息并实时衍射,光电探测器接收到透射的信号光与衍射的参考光的干涉信号并进行振动测量。系统中应用 $1/4$ 波片与偏振片组合来满足 $\pi/2$ 相位差的条件,从而获得更高的测量灵敏度。研究了 BSO 晶体中记录全息的条件对于衍射效率,进而对于干涉测振信号的影响。在最佳记录条件下,以压电陶瓷作为被测振动物体,最高达 90 kHz 的振动频率被准确地检测到。

参 考 文 献

- 1 S. Binu, V. P. Mahadevan Pillai, N. Chandrasekaran. Fibre optic displacement sensor for the measurement of amplitude and frequency of vibration [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(8): 1537~1543
- 2 Suat Topcu, Luc Chassagne, Yasser Alayli *et al.*. Improving the accuracy of homodyne Michelson interferometers using polarisation state measurement techniques[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **247**(1-3): 133~139
- 3 Kiyofumi Matsuda, BiQing Ye, Norihiro Fukuchi *et al.*. Holographic vibration measurements of rough surfaces using a LCSLM[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **275**(1): 53~56
- 4 Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1177~1182
马 宾, 徐 健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1177~1182
- 5 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1430~1434
禹延光, 郭常盈, 叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1430~1434
- 6 Shashi Prakash, Sanjay Upadhyay, Chandra Shakher. Real time out-of-plane vibration measurement using talbot interferometry [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2000, **33**(4): 251~259
- 7 S. L. Zhen, B. Chen, L. Yuan *et al.*. A novel interferometric vibration measurement sensor with quadrature detection based on $1/8$ wave plate [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2010, **42**(2): 362~365
- 8 T. K. Gangopadhyay. Prospects for fibre Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fibre-optic vibration sensing [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2005, **113**(1): 20~38
- 9 Li Yanhui, Wu Zhensen, Wu Yingli. Small damping vibration measurement using laser Doppler effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 231~235
李艳辉, 吴振森, 武颖丽. 基于激光多普勒法测量微小阻尼振动 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 231~235
- 10 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
张 乐, 吴 波, 叶 雯等. 基于光纤光栅法布里珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- 11 Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805005
邹红波, 梁大开, 曾 捷等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅振动传感器的动态解调 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805005
- 12 R. Bittner, K. Meerholz, S. Stepanov. Nonsteady-state photorefractive EMF effect in photorefractive polymers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **74**(24): 3723~3725
- 13 M. Paul, B. Betz, W. Arnold. Interferometric detection of ultrasound from rough surfaces using optical phase conjugation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(22): 1569~1571
- 14 P. Delaye, A. Blouin, D. Drolet *et al.*. Detection of ultrasonic motion of a scattering surface using photorefractive InP:Fe under an applied dc field [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7): 1723~1734
- 15 P. Delaye, L. A. Montmorillon, G. Roosen. Transmission of time modulated optical signals through an absorbing photorefractive crystal [J]. *Opt. Commun.*, 1994, **118**(1-2): 154~164

栏目编辑: 何卓铭