

文章编号 1004-924X(2014)07-1781-06

基于 BSO 晶体反射式全息光栅的振动测量系统

张 斌, 韩旭光*, 冯其波, 高晓婧, 高 帅

(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:以光折变晶体硅酸铋(BSO)为记录介质,构建了基于反射式全息光栅零差干涉振动测量系统。系统中的参考光与被振动信号调制的信号光以反射式记录全息的方式射入 BSO 晶体,在晶体内干涉形成反射式动态全息并实时衍射,通过对信号光的透射光和参考光的衍射光所形成的干涉信号进行解调即可得到所测的振动信号。研究了两人射光束夹角、光强比、晶体晶向等测量条件对系统测量灵敏度的影响,分析了耦合增益与测量灵敏度的关系。结果表明,以压电陶瓷(PZT)为被测对象时,系统最高可探测到频率为 360 kHz 的振动信号。分析显示:由于反射式全息降低了布拉格光栅的空间周期,提高了入射晶体的信号光和参考光的耦合效率,故其测量灵敏度高于透射式全息光栅振动测量系统。

关键词:振动测量;BSO 晶体;反射式全息光栅;衍射效率

中图分类号:TH825;O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142207.1781

Vibration measurement system based on reflection holographic grating of crystal BSO

ZHANG Bin, HAN Xu-guang*, FENG Qi-bo, GAO Xiao-jing, GAO Shuai

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

* Corresponding author, E-mail:11121820@bjtu.edu.cn

Abstract: A vibration measurement system based on a reflection holographic grating was built up by using the photorefractive crystal bismuth silicate (BSO) as recording media. The reference beam and the signal beam modulated by a vibration signal were injected into the crystal and to form the reflection dynamic holography, then the diffraction was happened simultaneously. The vibration signal could be obtained by demodulating the interference signal formed by the transmitted signal beam and the diffracted reference beam. The impact of the measurement conditions on the measuring sensitivity was studied which include the convergence angle between the two incident beams, light intensity ratio, and the crystal orientation. The relationship between coupling gain and measuring sensitivity was analyzed. Experimental results indicate that this system can detect the vibration signal with a frequency up to 360 kHz when the piezoelectric ceramic(PZT) is a measuring target. It demonstrates that the measuring sensitivity by the proposed system is higher than that of the vibration measurement system based on the transmission holographic grating, because the reflection holography reduces the space period of Bragg grating and improves the coupling efficiency of the reference and signal beams.

Key words: vibration measurement;BSO crystal;reflection holographic grating;diffraction efficiency

收稿日期:2013-09-18;**修订日期:**2013-10-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60878054);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2009JBZ015ZK)

1 引言

高频、微小振动的测量在工业生产和科学研究中有着十分重要的意义,因此相应的测量方法也很多^[1-6]。基于非线性光折变晶体(Photo Refractive Crystal, PRC)的干涉测量方法可以实现高频、离面微小振动的高精度测量^[7-14],其基本原理应用了 PRC 折射率随光强空间分布而发生变化的性质。由于信号光和参考光在晶体内发生干涉会形成动态全息并实时衍射,对信号光的透射光和参考光的衍射光所形成的干涉信号进行解调即可得到所测的振动信号。

目前,国内外均开展了基于光折变晶体振动测量的相关研究。Klein M B 等人应用 CdTe 晶体,以波长为 1 064 nm 和 1 550 nm 的激光器为探测光源,构建起振动探测系统,测量了系统的灵敏度和频率响应,并对比了几种不同的探测技术^[7]。赵书安等人基于光干涉原理,采用计算机模拟的方式分析了应用 PRC 记录干涉条纹对准实时、离面小振幅振动的测量方法,结果表明该方法简单、易实现且精度高^[8]。de Oliveira I 等人基于光折变全息技术研制了一种测量二维平面机械振动的系统,可以对一个平面上不同点的离面振动进行实时测量,并定性给出了测量效果图^[9]。

按照 PRC 中记录全息的方式,基于非线性 PRC 的干涉测量装置可分为透射式和反射式。本课题组之前开展的研究主要集中在采用透射式全息记录的干涉测量装置,该装置对频率在 0.5~90 kHz 的振动信号有较好的探测结果^[10]。

本文研究了一种基于硅酸铋(BSO)晶体反射式全息光栅的零差干涉振动测量系统,重点研究了两入射光束夹角、光强比、晶体晶向等测量条件对测量灵敏度的影响,分析了耦合增益与测量灵敏度的关系,以压电陶瓷(PZT)为被测对象,系统最高能够准确地探测到频率为 360 kHz 的振动信号。

2 实验原理

2.1 基于光折变晶体反射全息光栅的干涉测振原理

实验时,将参考光束与被振动信号调制的信

号光束射入非线性 PRC,两束光在其内部发生干涉并形成动态全息,生成布拉格光栅,两光束都满足布拉格条件。参考光束经过光栅后的衍射光与信号光束的透射光在光电探测器上发生干涉,通过对干涉信号进行解调即可得到被测的振动信号。

根据参考光与信号光射入晶体的方向,又可将所记录的全息光栅分为透射式和反射式,其原理如图 1 所示。图中,PRC 内所形成的透射式和反射式全息光栅的光栅周期分别为:

$$\Lambda_1 = \lambda / (2n \sin \theta_1), \quad (1)$$

$$\Lambda_2 = \lambda / \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_2}, \quad (2)$$

式中: λ 是入射光在晶体中的波长, θ_1 和 θ_2 分别为透射式记录和反射式记录下的入射角, n 为晶体中的折射率。根据布拉格衍射原理,参考光的衍射光相当于参考光在各光栅面发生反射后的小部分反射光的叠加,因此,光栅周期越小,光栅越密,光栅面反射的光越多,所得到的衍射光越强^[15]。

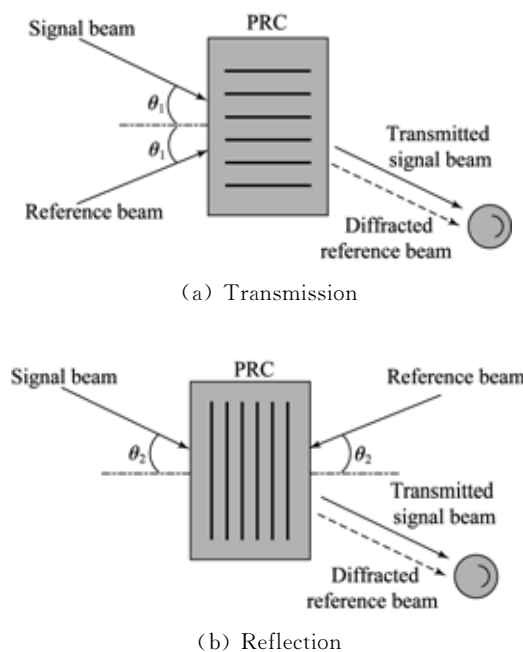


图 1 光折变晶体中透射式与反射式全息光栅形成原理图

Fig. 1 Principles of transmission and reflection holographic gratings

根据测量原理,两入射光经过晶体记录全息后产生的衍射参考光越强,衍射效率越高,在探测器上得到的干涉信号越好^[10],测量灵敏度也越

高。在式(1)和式(2)中,由几何关系可知 θ_1 和 θ_2 的取值都小于 90° ,且 θ_1 越大、 Δ_1 越小; θ_2 越小、 Δ_2 越小。在透射式的几何结构中,由于晶体厚度以及光束直径的影响, θ_1 不可能取得很大,而对于反射式结构, θ_2 可以取得很小,所以基于 PRC 的反射式全息干涉测振系统的测量灵敏度会比透射式全息测量系统高。理论表明,与透射式全息相比,反射式全息能够降低布拉格光栅的空间周期,提高信号光和参考光的耦合效率,相应的系统测量灵敏度也会提高。

2.2 测量条件对测量灵敏度影响的理论分析

两波耦合作用在 PRC 内写入体全息光栅,参考光和信号光在此相位栅的作用下,其光强和相位分布随传播距离的变化而变化,并发生强烈的能量转移。这里 Kogelnik 的简单耦合波理论不再适用,Hong 对参考光和信号光进行了理论修正^[16]。

当不考虑晶体本身对光的吸收和晶体表面对光的反射作用时,反射式全息光栅的衍射效率为:

$$\eta = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{(e^{\Gamma L/2} - 1)^2}{1 + \beta e^{\Gamma L}}, \quad (3)$$

式中: β 为信号光和参考光的光强比; L 为晶体厚度; $\Gamma = 2\pi n_1 / \lambda \cos \theta$,其中 λ 是晶体中的波长, θ 是光束的布拉格角,与图 1(b)中的 θ_2 互余, $n_1 = n_0^3 r_{\text{eff}} E_{\text{SC}}$, r_{eff} 为晶体有效电光系数, E_{SC} 为晶体内部空间电荷场^[9]。

β 、 θ_2 和 n_1 是影响衍射效率以及测量灵敏度的重要因素。 β 和 θ_2 分别由入射光的光强比和夹角决定。 n_1 由 r_{eff} 和 E_{SC} 两个系数决定,而这两个系数都与晶体内部的晶格结构有关。若晶体相对于入射光束的晶向发生了变化,相应的在入射方向上的晶格结构发生变化,则其有效电光系数和空间电荷场也会发生变化,从而引起衍射效率和系统测量灵敏度的变化。

3 实验及结果分析

3.1 实验装置

基于 BSO 晶体反射式全息光栅的振动测量系统的实验装置如图 2 所示。光源采用输出功率为 0~200 mW、波长为 532 nm 的单纵模连续固体激光器,PRC 采用 5 mm × 5 mm × 5 mm、(001)切割的硅酸铍晶体(BSO)。由激光器出射

的光经准直扩束后,再经过 1/2 波片,被偏振分光棱镜(Polarized Beam Splitter,PBS)分为两束,其中反射光为信号光,透射光为参考光,1/2 波片与 PBS 配合可调整两束光的光强比。信号光由被测振动物体表面反射,两次经过 1/4 波片改变偏振态后再经过 PBS,与参考光在 BSO 内干涉形成动态全息。参考光经过 BSO 后的衍射光与信号光的透射光在光电探测器上干涉,通过示波器观察干涉信号的强度可以分析出测量系统的灵敏度,同时通过 NI 数据采集卡和 Labview 编程采集和处理干涉信号可以解调出被测的振动信息。实验装置如图 3 所示。

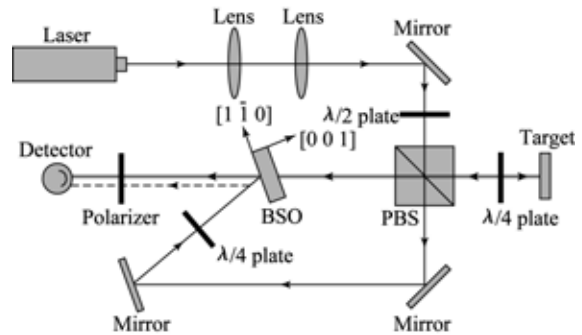
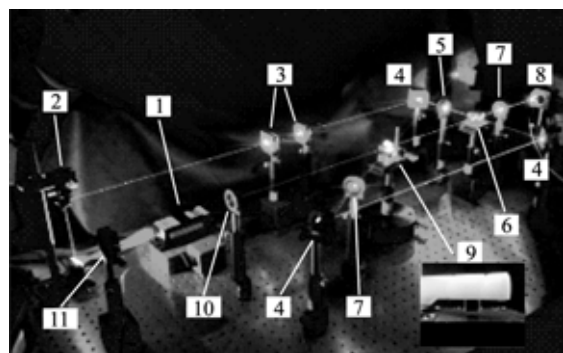


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup



1. Laser; 2. Beam riser; 3. Convex lens; 4. Mirrors; 5. $\lambda/2$ plate; 6. PBS; 7. $\lambda/4$ plate; 8. PZT; 9. BSO; 10. Polarizer; 11. Detector

图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

BSO 晶体在无外加电场时记录的是扩散全息,探测器上两束相干光之间的相位差为 0 或者 π ,不满足 $\pi/2$ 的相位匹配条件,系统测量灵敏度不高。在参考光路以及光电探测器前分别加入 1/4 波片和偏振片是为了引入一个相位差,以满

足 $\pi/2$ 的相位匹配条件,增强干涉信号,提高测量灵敏度^[10]。

3.2 实验结果

3.2.1 测量条件

为使系统具有较高的测量灵敏度,需要在光电探测器上得到较好的干涉信号。保持入射光束夹角为 150° ,其他测量条件不变,调节 PBS 前 $1/2$ 波片的角度,改变信号光和参考光的光强比,观察示波器上干涉信号强度的变化,结果如图 4 所示。可以看出,当光强比大约为 $1:5.6$ 时,干涉信号强度最大,即入射光束夹角为 150° 时的最佳光强比约为 $1:5.6$ 。

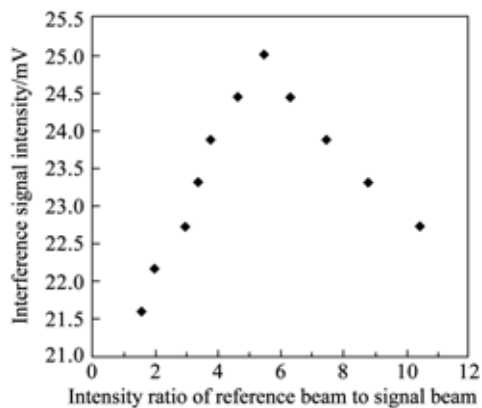


图 4 干涉信号强度与光强比的关系

Fig. 4 Interference signal intensity vs. intensity ratio of reference beam to signal beam

图 5 给出了信号光和参考光的夹角在 $120 \sim 175^\circ$ 下的最佳测量光强比。可以看出,在不同的入射角度下,最佳测量光强比大致相同,约为 $1:5.6$ 。

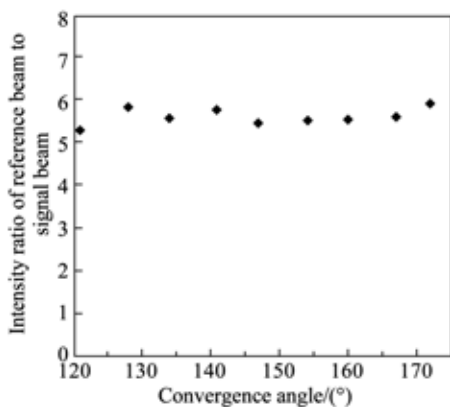


图 5 最佳光强比与光束夹角的关系

Fig. 5 Optimal intensity ratio of reference beam to signal beam vs. convergence angle

固定光强比为最佳光强比,只改变信号光和

参考光的夹角,其他测量条件不变,观察干涉信号强度的变化,可以得到入射角度与系统测量灵敏度的关系。图 6 给出了两束光夹角与示波器上干涉信号强度的关系。从图中可以看出,入射角度对系统测量灵敏度的影响不大。

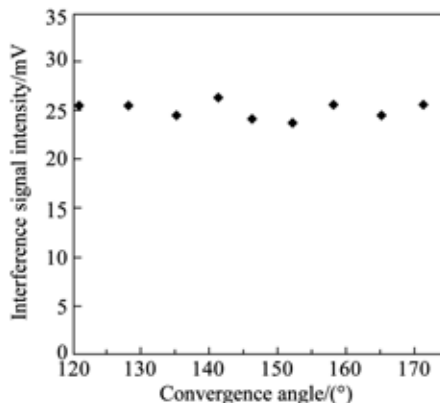


图 6 干涉信号强度与光束夹角的关系

Fig. 6 Interference signal intensity vs. convergence angle

图 7 给出了 BSO 晶体在 4 种不同晶向下的入射方式,表 1 则给出了相应入射方式下所测得的干涉信号强度。可以看出,将晶体入射面与出射面对调对系统测量灵敏度的影响不大,而将晶体以信号光束方向为轴翻转 90° 则对测量灵敏度的影响较大。

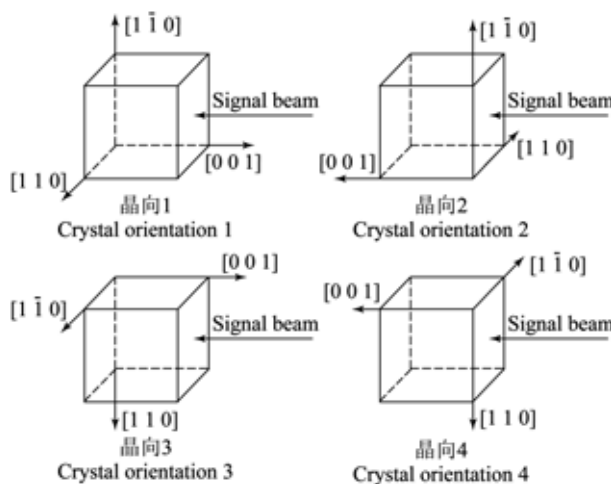


图 7 4 种不同晶向的入射方式

Fig. 7 Four incident ways with different crystal orientations

表 1 干涉信号强度与晶体晶向的关系

Tab. 1 Interference signal intensity vs. crystal orientation

晶体晶向	晶向 1	晶向 2	晶向 3	晶向 4
干涉信号强度/mV	23.8	23.0	15.1	14.5

3.2.2 耦合增益

二波耦合增益系数 Γ 是衡量二波耦合强弱的基本尺度,实验中 Γ 为:

$$\Gamma = -\frac{1}{d} \ln \left[\left(1 + \frac{I_s}{I_p} \right) \frac{I_s(d)(I_p=0)}{I_s(d)(I_p \neq 0)} - \frac{I_s}{I_p} \right], \quad (4)$$

式中: I_s 为入射信号光光强, I_p 为入射参考光光强, d 为晶体厚度,则 $I_s(d)(I_p=0)$ 为无参考光时信号光透过晶体的出射光光强, $I_s(d)(I_p \neq 0)$ 为有参考光时两光束耦合后的出射光光强^[11]。由图 8 可以看出,信号光和参考光的夹角在 $120 \sim 175^\circ$ 时,耦合增益与干涉信号强度——即测量灵敏度的曲线趋势大致相同。

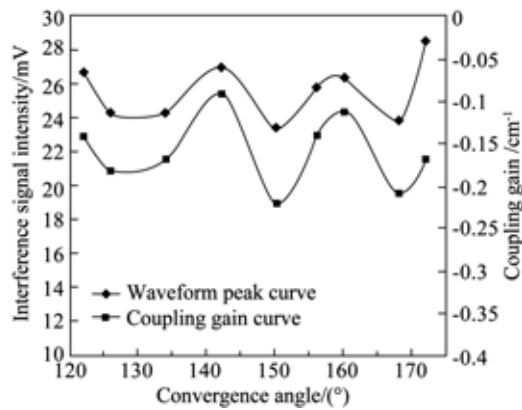


图 8 干涉信号强度与耦合增益的曲线趋势

Fig. 8 Trends of interference signal intensity and coupling gain

3.2.3 振动测量

将测量系统两入射光束的夹角调节为 160° , 信号光和参考光的光强分别为 4.5 mV 和 25.2 mV , 以信号发生器驱动的压电陶瓷 (PZT) 作为被测振动物体, 在 PZT 上加载一定频率的振动信号, 经系统探测后对探测到的时域信号进行傅里叶变换, 可以得到相应的频域信号, 如图 9 所示。系统最高可探测到频率为 360 kHz 的振动

信号, 测量结果与加载在 PZT 上的信号完全一致, 如果加入适当的滤波装置, 则测量结果会更好。

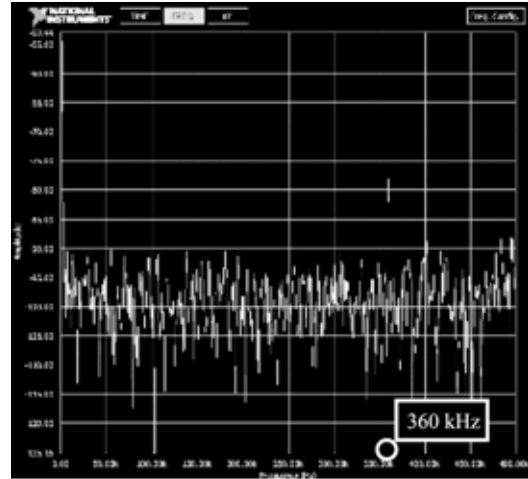


图 9 360 kHz 振动信号的测量结果

Fig. 9 Measurement results for vibration signal at 360 kHz

系统的测量灵敏度单位为 $\text{nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在 PZT 驱动电压不变的情况下, 所加载的振动信号的频率越高, 系统的测量灵敏度越高, 表明系统对于微小振动的探测能力越强。

4 结 论

本文研究了一种基于 BSO 晶体反射式全息光栅的振动测量系统, 与透射式相比, 反射式全息能够降低布拉格光栅的空间周期, 提高入射晶体的信号光和参考光的耦合效率, 使测量系统具有更高的灵敏度。通过实验分析了两入射光夹角、光强比、晶体晶向等测量条件对测量结果的影响, 并研究了耦合增益与测量灵敏度的关系。实验结果表明, 以压电陶瓷为被测振动物体, 测量系统最高可探测到频率为 360 kHz 的振动信号。

参考文献:

- [1] ROMASHKO R V, DI GIROLAMO S, KULCHIN Y N, *et al.*. Fast-adaptive fiber-optic sensor for ultra-small vibration and deformation measurement [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2007, 85(1): 012024.
- [2] 罗玉昆, 罗诗途, 罗飞路, 等. 激光超声信号去噪的经验模态分解实现及改进[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 479-487.
- [3] LUO Y K, LUO SH T, LUO F L, *et al.*. Realization and improvement of laser ultrasonic signal denoising based on empirical mode decomposition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 479-487. (in Chinese)
- [3] 姚峰林, 高世桥. 基于高速摄影动态测试微陀螺振动[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 165-170.

- YAO F L, GAO S H Q. Dynamic test of vibration for micro machined gyroscope based on high speed photography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 165-170. (in Chinese)
- [4] 武颖丽, 吴振森. 基于希尔伯特变化的微小振动激光多普勒信号处理[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 415-420.
- WU Y L, WU Z S. Micro-vibration laser Doppler signal processing based on Hilbert transform[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 415-420. (in Chinese)
- [5] 刘艳, 苏东奇, 杨怀江, 等. 高精度干涉检验移相算法对振动误差的免疫能力[J]. *中国光学*, 2010, 3(5): 500-508.
- LIU Y, SU D Q, YANG H J, *et al.*. Immunity of phase shifting algorithms to vibration errors in high-accuracy interferometry[J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(5): 500-508. (in Chinese)
- [6] SILVANO D, 王昭, 禹延光. 用于光电仪器和相关测量的自混合干涉技术(特邀)[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 93-115.
- SILVANO D, WANG ZH, YU Y G. Self-mixing interferometry used for instrumentations and measurements(invited) [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 93-115. (in Chinese)
- [7] KLEIN M B, SHCHERIN K. Adaptive receivers for laser ultrasonics using photorefractive CdTe [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, Optical Society of America*, 2003:CFK1.
- [8] 赵书安, 冯少彤, 王小芳, 等. 利用二波耦合实现微振动测量[J]. *激光杂志*, 2006, 27(5): 49-50.
- ZHAO SH AN, FENG SH T, WANG X F, *et al.*. Small vibration measurement by use of two-beam coupling[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(5): 49-50. (in Chinese)
- [9] DE OLIVERA I, FREJLICH J. Photorefractive holography for 2D mechanical vibrations measurement[C]. *Latin America Optics and Photonics Conference, Optical Society of America*, 2012: LM2A. 6.
- [10] 张斌, 冯其波, 由凤玲, 等. 基于 BSO 晶体的振动测量系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 90-94.
- ZHANG B, FENG Q B, YOU F L, *et al.*. Vibration measurement system based on the crystal BSO[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 90-94. (in Chinese)
- [11] 雷和平. 非线性光干涉测量微小振动方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- LEI H P. *Investigation of microvibration detection using interference of nonlinear optics* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [12] XIONG J, GLORIEUX C. Spectrally resolved detection of mixed acoustic vibrations by photorefractive interferometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(5): 054502-054502-11.
- [13] LAFOND E F, BRODEUR P H, GERHARDSTEIN J P, *et al.*. Photorefractive interferometers for ultrasonic measurements on paper[J]. *Ultrasonics*, 2002, 40(INEEL/JOU-00-00021).
- [14] 张来明, 谢冀江, 郭劲, 等. CO 激光在非线性晶体 ZnGeP₂ 和 GaSe 中的混频效应[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 277-286.
- ZHANG L M, XIE J J, GUO J, *et al.*. CO laser frequency mixing in nonlinear crystals ZnGeP₂ and GaSe[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 277-286. (in Chinese)
- [15] 刘思敏, 郭儒, 许京军. 光折变非线性光学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 38-58.
- LIU S M, GUO R, XU J J. *Photorefractive Nonlinear Optics and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 38-58. (in Chinese)
- [16] HONG J H, SAXENA R. Diffraction efficiency of volume holograms written by coupled beams[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(3): 180-182.

作者简介:



张斌(1972—),女,吉林长春人,博士,副教授,2000年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光与光电检测技术的研究。
E-mail: bzhang@bjtu.edu.cn



韩旭光(1988—),男,辽宁锦州人,硕士研究生,2011年于北京交通大学获得学士学位,主要从事激光与光电检测技术的研究。
E-mail: 11121820@bjtu.edu.cn

(本栏目编辑:曹金)
(版权所有 未经许可 不得转载)