

基于 GaAs 晶体的微小振动非线性干涉测量

高晓婧 张斌 晏斌 冯其波

(北京交通大学理学院, 北京 100044)

摘要 研究了一种基于 GaAs 晶体非稳态光感生电动势效应的非线性激光干涉振动测量系统,以固体激光器为光源,以零差干涉光路进行测量。信号光被一定频率微小振幅振动调制后与参考光在 GaAs 晶体表面发生干涉,根据光感生电动势效应,高于一定的截止频率, GaAs 晶体将产生正比于振动幅值的交变电流信号,从而进行振动测量。对影响输出光感生电流的主要因素进行了实验研究,包括干涉条纹空间频率及 GaAs 电极间距,确定了最佳工作条件。将该系统的测量结果与商用测振仪的测量结果进行了比较,结果一致。

关键词 测量;非线性干涉测量;微小振动;GaAs 晶体;光感生电动势

中图分类号 O329 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s108012

Micro-Vibration Interferometry Based on Nonlinear Crystal of GaAs

Gao Xiaojing Zhang Bin Yan Bin Feng Qibo

(School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Homodyne interferometry based on nonlinear GaAs crystal for micro-vibration measurement is investigated by conducting an experiment. In the interferometer that with 532 nm laser, signal beam is modulated by a vibrating mirror and interferes with reference beam on the surface of GaAs crystal. The interferometric signal produces photo-induced current that relates to vibration amplitude when vibration frequency is beyond cut-off frequency of GaAs crystal. Influences of spatial frequency of interferometric fringes and electrode space of GaAs crystal on the photo-induced current of the GaAs crystal are studied and the optimum parameters are obtained. Experimental results are compared with those from a commercial vibration measurement instrument and coincided well.

Key words measurement; nonlinear interferometric measurement; micro-vibration; GaAs crystal; photo-electromotive force

OCIS codes 040.5150; 120.1088; 120.1880

1 引言

随着精细加工和微机械技术的发展及应用,对于物体的微小振动测量受到广泛重视。某些情况下,需要测量物体极其微小的振动或形变,有时甚至需要在高温高压、放射性或有腐蚀性的特殊场合下进行,因此振动测量向着无损、非接触、高灵敏度和高带宽方向发展。光学干涉测量方法应用较多,可分为线性和非线性光干涉仪。如零差、外差干涉仪, Fabry-Pérot 干涉仪是典型的线性光干涉仪;相位共轭干涉仪、二波混频干涉仪以及光感生电动势干涉

仪则因为使用了非线性晶体而属于非线性干涉仪^[1~6]。

其中光感生电动势干涉仪是利用了 GaAs 这类非线性半导体晶体作为干涉仪的探测器,当干涉图样照射晶体表面时,将在晶体中产生与干涉图样强度空间分布相对应的内电场,当有物体振动调制干涉图样时,空间电荷场将产生时变的电流输出,进而对物体振动的幅值和频率进行测量。这种干涉测振系统具有可以补偿干涉条纹图样缓慢畸变和相位漂移的独特性能,因此光电信号转换对来自周围环境

收稿日期: 2011-07-13; 收到修改稿日期: 2011-10-24

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: 高晓婧(1981—),女,博士研究生,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: 09118369@bjtu.edu.cn

导师简介: 张斌(1972—),女,副教授,主要从事光学系统设计、检测、信息处理及光电子材料与器件等方面的研究。

E-mail: bzhang@bjtu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员;2009166)

的各种影响与激光噪声不敏感,并具有分辨率高、响应平坦、适应性强等优点,具有广泛的应用前景。

本文通过实验研究了影响光感生交变电流的因素。并用 Polytech 公司的 PDV100 测振仪测量相同的压电镜振动,与本文所研究的系统进行了测量对比与结果分析。

2 测量原理

利用 GaAs 晶体进行微小振动测量是基于晶体的光感生电动势效应,其机理如图 1 所示^[7]。两相干光束形成的干涉图样 $I(x)$ 照射在晶体表面,激发产生了非均匀的自由载流子。光生载流子向暗区扩散导致了陷阱之间电荷的重新分布,产生了一个空间电荷场 E_{sc} ,该场栅相对于光干涉图样和光电导分布在空间上有相位差。在稳态条件下电流 $J = \int \sigma(x) E_{sc}(x) dx = 0$ 。当干涉图样沿着场栅矢量做一定频率的振动时,在空间周期振荡的自由载流子与空间分布相对稳定的电场之间产生了时间相关的相位移动,短接在电路中的晶体被激发产生交变的电流信号,电流密度 J 的复振幅为^[8~11]

$$J = \frac{m^2 \Delta}{2} \sigma_0 \frac{K}{1 + K^2 L_D^2} \frac{K_B T}{e} \frac{i\omega/\omega_0}{1 + i\omega/\omega_0}, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{\sigma_0}{\epsilon \epsilon_0 (1 + K^2 L_D^2)}, \quad (2)$$

式中 ω_0 为截止频率,与晶体的平均光电导 σ_0 成正比, ω 为调制干涉条纹的被测振动频率;只有当 $\omega > \omega_0$ 时,才产生与振动振幅成正比的交变电流。 m 为干涉条纹的对比度, Δ 为被正弦振动调制的干涉条纹振幅, K 为干涉条纹的空间频率, L_D 为载流子的扩散长度, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, e 为电子电

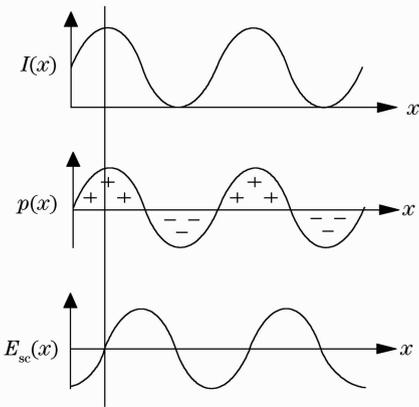


图 1 光折变晶体中激发非稳态光感生电动势过程
Fig. 1 Excitation of the non-steady-state photo-electromotive force in photorefractive crystal

荷量。(1) 式是在假设 $\omega \ll 1$ 和 $\Delta \ll 1$,且 $1/K$ 和 L_D 都远小于特征吸收长度 $1/\alpha$ 的低光吸收条件下得到的。

3 实验及实验结果

3.1 实验装置

基于 GaAs 晶体的微小振动测量系统如图 2 所示。波长为 532 nm 的单纵模 Nd:YAG 激光器发出连续激光,被偏振分光棱镜(PBS)分为两束,1/2 波片与 PBS 共同使用以调整两束光的光强比。其中一束光经 M_2 反射,作为参考光束;另一束光射向被测振动物体,并被反射成为信号光,信号光两次通过 1/4 波片,改变偏振态。参考光与信号光在 GaAs 晶体表面干涉,利用锁相放大器测量晶体中所产生的交变电流。干涉条纹的空间频率为 $K = 2\pi/\Delta$,其中 Δ 是干涉条纹间距。GaAs 晶体在前表面两侧镀银电极,所使用的两块晶体电极之间距离分别为 2 mm 和 4 mm。被测振动物体为在一定电压和频率驱动下的压电镜。

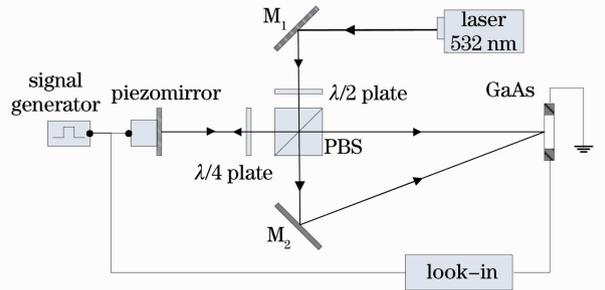


图 2 振动测量实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup for vibration measurement

3.2 实验结果

3.2.1 干涉条纹空间频率及 GaAs 电极间距对光感生电流大小的影响

在两干涉光束光强均为 1.8 mW,压电镜驱动电压为 3 V,两干涉光束夹角依次为 0.14、0.19、0.26 rad 时,锁相放大器测得输出光感生电流随调制频率变化的曲线如图 3 所示。可知,对应于三个不同夹角的干涉条纹的空间频率 $K_{0.26} > k_{0.19} > K_{0.14}$,在相同调制频率下,输出光感生电流的大小为 $J_{0.26} < J_{0.19} < J_{0.14}$,即干涉条纹空间频率高,对应的输出电流越小,与(1)式得到的结论相符^[12]。

根据上述实验结果,实验条件设置为每一干涉光束光强均为 2 mW,夹角 0.14 rad。使用电极间距分别为 2 mm 和 4 mm 的 GaAs 晶体,压电镜调制频率为 40 kHz 和 70 kHz,所输出的光感生电流随

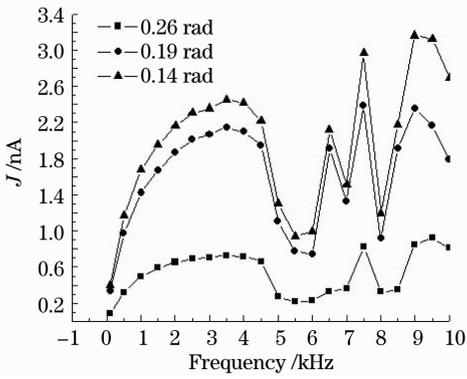


图3 两光束不同夹角时光感生交变电流随频率变化的曲线

Fig. 3 Frequency dependences on the output ac current observed for different K values

压电镜调制电压变化的曲线如图4所示。可以看出,电极间距小的晶体输出光感生电流大,并随压电镜调制电压的增加而增加。图5给出光斑与晶体表面接触情况, R_2 、 R_4 分别为光斑覆盖晶体电极的长

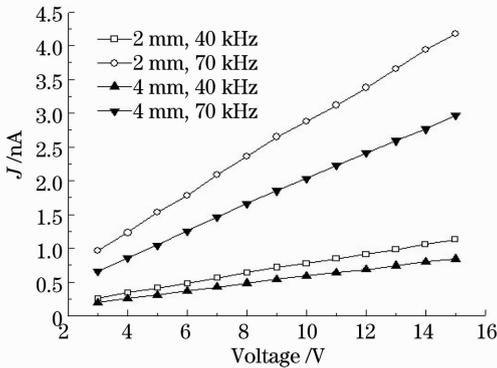


图4 不同电极间距的晶体光生电流与压电镜驱动电压的关系

Fig. 4 Dependence of drive voltage of piezo mirror on the output ac current observed for different interelectrode distance

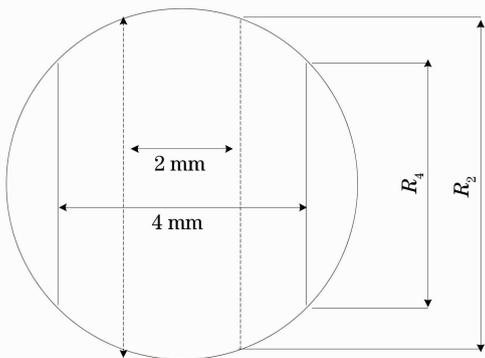


图5 光斑与电极接触长度示意图

Fig. 5 Schematic of contact length between light spot and the electrodes

度。在相同尺寸光斑的照射下,覆盖电极长度越大,收集的载流子就越多。

由实验结果可知,影响输出电流的最主要因素是干涉条纹的空间频率与所用 GaAs 晶体的电极间距。晶体在振动调制下干涉条纹的移动所产生交变电流的大小与干涉光束的夹角有关,即与干涉条纹空间频率有关,空间频率越高,输出电流越小。此外,光感生电流的大小不仅与光生载流子的浓度有关,而且与晶体探测器收集载流子的能力有关。光斑覆盖电极长度越大,收集载流子的能力就越强。

3.2.2 与 PDV100 测振仪的测量对比

在相同的测量条件下,即两干涉光束光强均为 0.8 mW,夹角为 0.14 rad。利用本系统与 Polytech 公司的 PDV100 测振仪对不同驱动电压及频率下的压电镜振动进行同时测量,PDV100 的测量频率带宽为 22 kHz。压电镜驱动频率为 17~22 kHz 之间时,本系统与 PDV100 测振仪对不同振动振幅测量曲线基本吻合,图6所示为 17 kHz 驱动频率下的测量结果,压电镜的振幅是随着压电镜的驱动电压的增加近似线性增加。而在低于 17 kHz 时,两者测量曲线并不吻合,图7所示为压电镜在 7 kHz 和 15 kHz 是两系统测量结果对比。在压电镜振动频率低于 17 kHz 时,两者测量曲线不吻合。

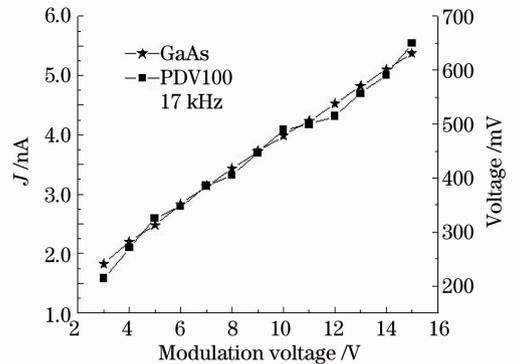


图6 GaAs 光感生电流与调制幅度的关系曲线与使用 PDV100 在相同的条件下的测量曲线

Fig. 6 Photo-induced current of GaAs dependence on modulation amplitude and output voltage of PDV100 in the same measuring condition

产生这种偏差的原因可做如下解释:当照射在 GaAs 晶体表面的干涉条纹以低于截止频率的调制频率 ω 振动时,对于 GaAs 晶体表面上某一点,光强也以频率 ω 变化,晶体中载流子对晶体中陷阱的装填和排空释放引起的光电导弛豫过程变化缓慢,该点的光电导对于光强变化的响应不及时,因此造成测量不准确^[13,14]。

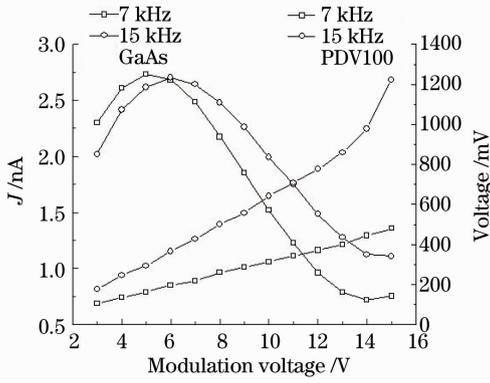


图 7 GaAs 光生电流随压电镜调制电压变化的曲线及 PDV100 测量随压电镜调制电压变化的输出电压曲线

Fig. 7 Photocurrent of GaAs dependence on modulation voltage of piezo mirror and output voltage of the PDV100 dependence on modulation voltage of piezo mirror

3.2.3 对频率高于 22 kHz 时的振动测量

如图 8 所示,是测量系统对振动频率在 22 kHz 以上的测量结果。在相同条件下,使用不同电极间距的 GaAs 晶体测量得到的输出光感生电流随调制频率变化的曲线趋势一致,可测量到 90 kHz 的振动频率。

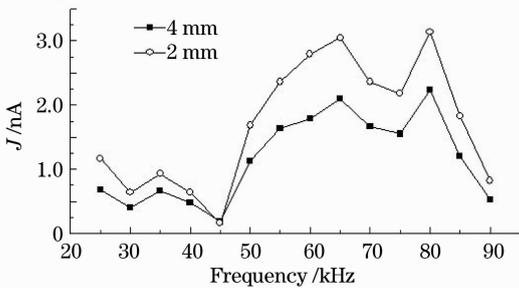


图 8 90 kHz 范围内使用不同电极间距的晶体测得光感生电流随压电镜调制频率变化曲线

Fig. 8 Dependence of photo-induced current on modulation frequency of piezo mirror in range less than 90 kHz by different interval between electrodes of GaAs crystal

4 结 论

设计了一种基于 GaAs 晶体的微小振动非线性干涉测量系统,实验研究了输出光感生电流的大小与干涉条纹空间频率与晶体表面电极间距的关系,进而确定了系统结构的最佳工作条件。本系统与 PDV100 激光测振仪测量相同的振动时,证明测量系统存在截止频率。在高于截止频率的条件下,可以测量宽带、微小振动;该系统对周围环境干扰不敏

感,在实验室内正常光照及没有对周围环境的低频振动隔离的条件下,输出电流稳定。

参 考 文 献

- 1 Qian Menglu. The laser ultrasonic detection technology and application [J]. *Shanghai Measurement and Testing*, 2003, **30**(1): 4~7
- 2 钱梦騄. 激光超声检测技术及其应用[J]. 上海计量测试, 2003, **30**(1): 4~7
- 3 Ponciano Rodriguez, Sudhir Trivedi, Feng Jin *et al.*. Pulsed-laser vibrometer using photoelectromotive-force sensors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(9): 1893~1895
- 3 Chen-Chia Wang, Sudhir Trivedi, Feng Jin *et al.*. High sensitivity pulsed laser vibrometer and its application as a laser microphone[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(5): 051112
- 4 Bittner Reinhard, Meerholz Klaus, Stepanov *et al.*. Nonsteady-state photo-EMF effect in photorefractive polymers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(24): 3723~3725
- 5 Igor A. Sokolov. Adaptive photodetectors novel approach for vibration measurements[J]. *Measurement*, 2000, **27**(1): 13~19
- 6 S. I. Stepanov, I. A. Sokolov, G. S. trofimov. Measuring vibration amplitudes in the picometer range using moving light gratings in photoconductive GaAs:Cr[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(21): 1239~1241
- 7 Marvin Klein, Bruno Pouet, Sebastien Breugnot *et al.*. Semiconductor-based receivers aid industrial inspection and process control [OL]. [2011-10-13]. <http://www.isa.org/InTechTemplate.cfm?Section=Archive4&template=/ContentManagement/ContentDisplay.cfm&ContentID=4467>
- 8 Liu Simin, Guo Ru, Xu Jingjun. Photorefractive Hontinear Optics and Its Application [M]. Beijing: Science Press, 2004
- 9 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
- 9 M. P. Petrov, I. A. Sokolov, S. I. Stepanov. Non-steady-state photo-electromotive-force induced by dynamic gratings in partially compensated photoconductors [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(5): 2216~2225
- 10 S. Stepanov, P. R. Montero, M. A. Celis Flores *et al.*. Interferometric applications of GaAs adaptive photo-EMF detectors[J]. *J. Opt. Technol.*, 2002, **69**(6): 428~431
- 11 N. A. Korneev, S. I. Stepanov. Non-steady-state photoelectromotive force in semiconductor crystals with high light absorption[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(4): 2736~2738
- 12 L. -k. Shark, P. L. Salter, J. P. Smith *et al.*. Developments in low cost optical detection and signal processing for laser ultrasonics [C]. Montreal: 16th World Conference on Nondestructive Testing, 2004
- 13 N. Korneev, S. Mansurova, S. Stepanov. Nonstationary currents in bipolar photoconductor with slow photoconductivity relaxation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(5): 2925~2931
- 14 N. Korneev, S. Mansurova, P. R. Montero *et al.*. Fast and slow processes in the dynamics of near-surface space-charge grating formation in GaAs [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(2): 396~499

栏目编辑: 何卓铭