

文章编号: 0253-2239(2010)06-1796-04

新型微米光栅加速度计光学结构研究

张群雁 周 震 冯丽爽 姚保寅

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院微纳测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 为了提高加速度计的灵敏度,以适应高精度测量的需要,加速度计光学传感器结构灵敏度的提高是至关重要的。在比较了现有光栅加速度计光学传感结构的基础上,提出了一种新型的基于微米光栅的加速度计光学传感器结构的理论设计,建立了数学模型,并对其光学结构的性能进行了分析。给出了衍射光光强分布的理论公式,利用 Matlab 绘制出光强的变化曲线,分析了光学结构参数对传感器灵敏度的影响。通过改变光学结构的主要参数,能够提高光学传感器结构的灵敏度。进行了光学传感器结构的演示实验,实验结果验证了理论分析的正确性。

关键词 光栅;加速度计;光学传感器结构;高灵敏度

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1796

Research on Optical Structure of the Novel Micron-Grating Accelerometer

Zhang Qunyan Zhou Zhen Feng Lishuang Yao Baoyin

(Key Laboratory of Micro-nano Measurement-Manipulation and Physics (Ministry of Education) School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In order to improve the sensitivity of accelerometer and meet the needs of high-precision measurement, it is very important to improve the sensitivity of optical sensing structure. A theoretical design of a novel grating-based accelerometer is proposed. The mathematical model is established and the optical properties of the structure are analyzed. The formula of the optical intensity is given, and the curve of the optical intensity variation is figured with Matlab. The main factors of the sensitivity are analyzed. Through changing the parameters of the structure, the sensitivity of the optical sensor is improved. An experimental demonstration experiment is built and the correctness of the theoretical analysis is verified.

Key words gratings; accelerometer; optical sensing structure; high sensitivity

1 引 言

加速度传感器是一加速度计的核心部件,是一种重要的力学传感器,在交通、军事、地理探测等方面有着广泛的应用。随着光学方法在测量微位移和微加速度上的应用,加速度传感器的灵敏度摆脱了传统电容的限制,得到了很大的提高^[1,2]。光栅加速度传感器将衍射光栅应用于加速度计,具有体积小、灵敏度高、抗地磁干扰等优良特性,随着各种应用对精度和集成度要求的提高,越来越受到人们的关注^[3,4]。光栅加速度传感器通常以光强型光栅位移传感器为基础,基本元件为光源、光栅传感头和光电转换元件。其工作原理是:当加速度作用于振动

膜片时,腔长发生改变,从而被检测级次的光强发生变化,通过对光强的测试,检测加速度信息^[5,6]。

本文提出了一种改进的加速度计结构,能够获得更高的测量精度。对其进行了理论分析和模拟,并通过实验验证了理论分析的正确性。

2 光栅传感器常见结构

Hall 等^[7]提出了一个光栅位移传感器,结构如图 1 所示,在透明基底上制作金属光栅,可动薄膜作为反射面,形成相位敏感光栅。当光束入射到光栅上时,可动薄膜和金属光栅分别反射入射光,并干涉形成衍射光束,光束的强度 I 与可动薄膜和参考梳

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-09-07

作者简介: 张群雁(1984—),男,硕士研究生,主要从事 MOEMS 加速度计方面的研究。E-mail: zuoyanzh@163.com

导师简介: 冯丽爽(1968—),女,博士,教授,主要从事微光学惯性器件技术方面的研究。

E-mail: fenglishuang@buaa.edu.cn

齿的位移 d 成正弦或余弦关系。这种结构形式中在间隙改变的同时反射面会发生倾斜或弯曲变形,会影响到衍射光斑的质量^[7,8]。图 2 所示为清华大学采用的集成光栅干涉加速度测量的原理图。对图 2 所示的反射面在位移改变时存在的倾斜、弯曲变形,提出了改进设计方案,并将其应用于加速度计测量。改进方案:将反射面加工在可动部件底部,可动部件由支撑梁和固定部分连接。可动部件的厚度远大于支撑梁,这样,可以使可动部件在产生位移时,保持平面镜不发生弯曲,不影响光斑的品质^[9]。

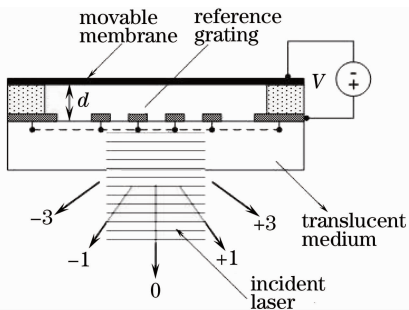


图 1 光栅干涉位移传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grating assisted interference displacement sensor

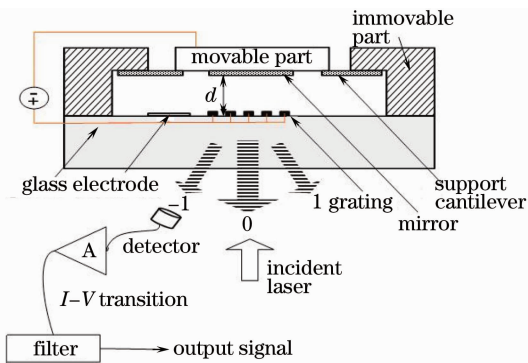


图 2 光栅干涉加速度检测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grating assisted interference acceleration sensor

图 1 和图 2 所示的两种结构形式的光栅干涉传感器,均可以实现对微小位移或加速度的检测。但测量精度仍有很大的提升空间^[10]。

3 新型微光机电系统(MOEMS)光栅加速度传感器原理

新型光栅加速度计结构如图 3 所示,传感头光学结构部分由敏感质量块底部的反射镜、光栅和光栅底部的反射镜组成。与传统的光栅位移传感器光学结构相比,新型的光栅加速度计光学结构做了改进,在衍射光栅下部增加一层金属薄膜作为反射镜,

在光栅间隙和反射平面镜之间形成多光束干涉,以提高加速度计的测量精度。

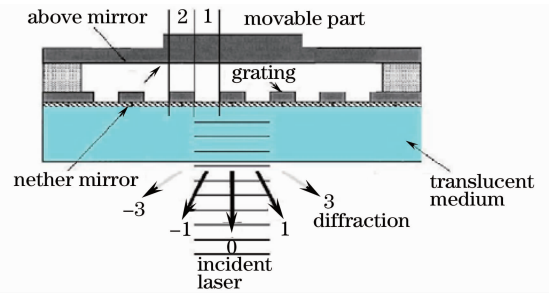


图 3 新型光栅加速度传感器结构图

Fig. 3 Schematic diagram of the novel grating assisted interference acceleration sensor

如图 3 所示,光源从光栅底部入射,光束经底面反射镜后,一部分光线被光栅反射,另一部分则在下反射镜和上反射镜之间经过多重反射。这两部分光再进行干涉,形成多级次的衍射条纹。根据薄膜光学理论很容易得到 1 区和 2 区对振幅的反射率分别为

$$r_1 = \frac{\sqrt{R} + \exp(-i\phi_0)}{1 + \sqrt{R}\exp(-i\phi_0)}, \quad (1)$$

$$r_2 = 1, \quad (2)$$

$$\phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda}d_c, \quad (3)$$

式中 R 为光栅底部反射镜的反射率, d_c 为空气腔腔长, λ 为光源波长。

将多级次衍射条纹的光强分布视为缝宽分别为 a 和 b , 光栅常数为 d 的两个光栅的衍射条纹的叠加。根据物理光学原理,得到缝宽为 a 光栅常数为 d 的光栅在屏上的振幅分布为

$$\tilde{E}(p) = A \frac{\sqrt{R} + \exp(-i\phi_0)}{1 + \sqrt{R}\exp(-i\phi_0)} \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right) \left[\frac{\sin(N/2\delta)}{\sin(\delta/2)}\right] \exp[i(N-1)\delta/2], \quad (4)$$

入射光通过缝宽为 b , 光栅常数为 d 的光栅在屏上的振幅分布为

$$\tilde{E}_2(p) = A \left(\frac{\sin \beta}{\beta}\right) \left[\frac{\sin(N/2\delta)}{\sin(\delta/2)}\right] \exp[i(N-1)\delta/2], \quad (5)$$

式中

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda}a \sin \theta, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda}b \sin \theta, \quad (7)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}d \sin \theta, \quad (8)$$

式中 θ 为衍射角。

将衍射光进行振幅叠加,得到总的光振幅分布为

$$\tilde{E}_2(p) = A \left[\frac{\sin(N/2\delta)}{\sin(\delta/2)} \right] \exp[i(N-1)\delta/2] \frac{1}{(1+R+2\sqrt{R}\cos\phi_0)} \cdot \left[-i\sin\phi_0(1-R)\frac{\sin\alpha}{\alpha} + (2\sqrt{R}+\cos\phi_0+R\cos\phi_0)\frac{\sin\alpha}{\alpha} + (1+R+2\sqrt{R}\cos\phi_0)\frac{\sin\beta}{\beta} \right]. \quad (9)$$

光强分布为

$$I = A^2 \left[\frac{\sin(N/2\delta)}{\sin(\delta/2)} \right]^2 \frac{1}{(1+R+2\sqrt{R}\cos\phi_0)^2} \left\{ \left[i\sin\phi_0(1-R)\frac{\sin\alpha}{\alpha} \right]^2 + \left[(2\sqrt{R}+\cos\phi_0+R\cos\phi_0)\frac{\sin\alpha}{\alpha} + (1+R+2\sqrt{R}\cos\phi_0)\frac{\sin\beta}{\beta} \right]^2 \right\}. \quad (10)$$

运用 Matlab 对光强分布进行模拟。取 $\varphi_0 = 2n\pi, R = 0$, 对光栅结构参数 a, b 和 d 对光强度曲线的影响进行分析。由图 4 可知,当光栅结构参数 a 和 b 不相等时,0 级和 1 级衍射光显著降低。取 $a = b$ 。

当光栅栅齿宽度为光栅常数 d 的二分之一时,光强分布公式可简化为

$$I(m) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin(m\pi/2)}{m\pi/2} \right] \left\{ 1 + (-1)^m \cos \left[2\arctan \left(\frac{1-\sqrt{R}\tan\frac{\phi_0}{2}}{1+\sqrt{R}\tan\frac{\phi_0}{2}} \right) \right] \right\}, \quad (11)$$

式中 m 为衍射级次。

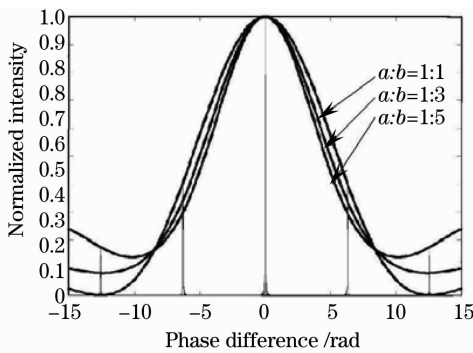


图 4 不同光栅结构时的光强分布

Fig. 4 Calculated intensity for different grating structures

图 5 为不同反射率时的光强曲线。由图 5 可知反射率越高,光强变化曲线越陡峭,加速度计的灵敏度越高。由图 6 可知 $R=0.8$ 较 $R=0$ 时测量精度提高了近 20 倍,大大增加了 MOEMS 加速度计测量的精度。

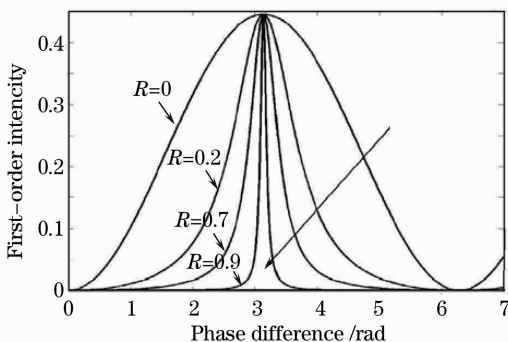


图 5 不同反射率 R 时光强变化曲线

Fig. 5 Calculated diffraction for different values of R

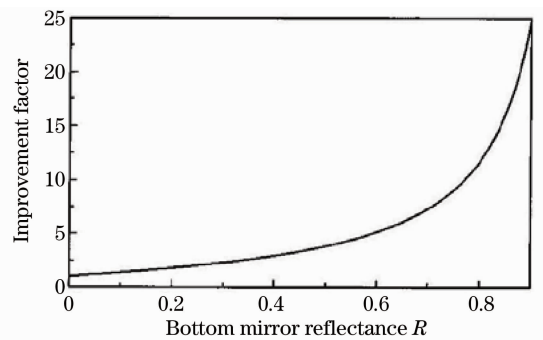


图 6 不同反射率 R 时测量精度的提高因素

Fig. 6 Measurement accuracy improvement factor as a function of R

4 光学结构设计的实验验证

由于 MOEMS 光栅加速度计还处于加工阶段,因此对光栅加速度计的光学结构搭建了模型,进行了演示实验。实验装置如图 7 所示,实验采用 JDW-3 型激光器作为光源,光功率为 5 mW,波长为 635 nm,由恒定电流驱动。衍射光栅采用两片光栅常数为 $10\ \mu\text{m}$ 的光栅,在一片光栅上蒸镀一层半透半反膜,光路未调整准直的衍射斑如图 8(a)所示,调整准直后的衍射斑如图 8(b)所示。加速度计可动部分由固定在微调平台上的反射镜代替,微调平台的调节精度为 $0.2667\ \mu\text{m}/\text{V}$,利用微调平台调节反射镜与光栅之间的距离,利用 OPHIR 光功率计对一级光强进行测试,记录数据。根据测得的光强数据,运用 Matlab 作图,光强变化如图 9 所示。

通过演示实验,观测到了一级光强随着腔长的

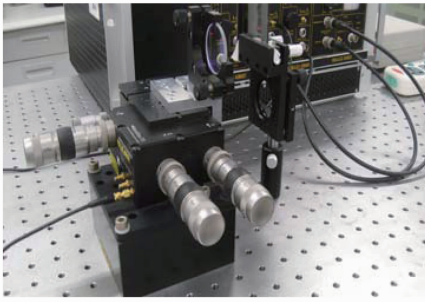


图 7 演示实验装置

Fig. 7 Equipment for demonstration

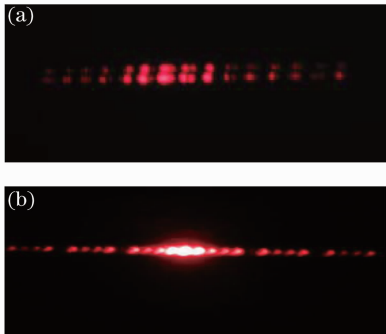


图 8 光路(a)未调整和(b)准直的衍射斑

Fig. 8 Diffraction images (a) before and (b) after adjusting the equipment

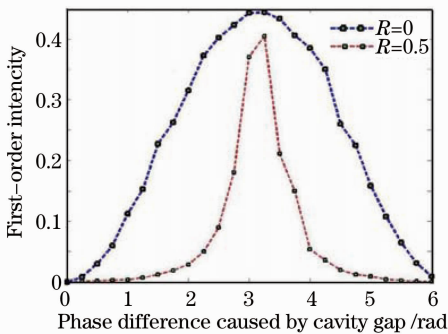


图 9 不同反射率时的一级光强变化曲线

Fig. 9 Calculated first-order diffraction for different values of R

改变而产生的明显的变化现象,但由于振动的影响,光强变化曲线有一定的波动;从图 9 中反射率 R 分别为 0 和 0.5 的光强曲线可以看出,反射率为 0.5 时,光强变化曲线比反射率为 0 时陡峭,提高了传感

器光学结构的灵敏度,证实了理论分析的正确性。

5 结 论

介绍了一种改进了光栅加速度传感器的光学结构的微米光栅加速度计,并对结构进行了理论分析。分析表明,随着光栅底部反射镜反射率 R 的增加,加速度计测量精度也将随之提高。通过比较 R=0.8 与 R=0 时的光强变化曲线,显示灵敏度提高了近 20 倍。演示实验也表明:在提高光栅底部反射镜的反射率 R 时,光强变化曲线将变得陡峭,从而能够提高光学传感结构的灵敏度。实验结果验证了理论分析的正确性。

参 考 文 献

- 1 S. R. Manalis, S. C. Minne, A. Atalar. Interdigital cantilevers for atomic force microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(25): 3944~3946
- 2 G. G. Yaralioglu, A. Atalar, S. R. Manalis *et al.*. Analysis and design of an interdigital cantilever as a displacement sensor [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(12): 7405~7414
- 3 E. B. Cooper, E. R. Post, S. Griffith *et al.*. High-resolution micromachined interferometric accelerometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(22): 3316~3318
- 4 D. carr Laterally deformable nanomechanical zeroth-order gratings anomalous[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(18): 1636~1638
- 5 Loh Nin C., Schmidt Martin A., Manalis Scott R. Sub-10 cm³ interferometric accelerometer with nano-g resolution [J]. *J. Micro-Electromechanical Systems*, 2002, **11**(3): 182~187
- 6 J. D. Hamilton High, Frequency optoacoustic arrays using etalon detection [J]. *Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics, And Frequency Control*, 2000, **47**(1): 160~169
- 7 Neal A. Hall, Degertekin F. Levent, Integrated optical interferometric detection method for micromachined capacitive acoustic transducers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(20): 3859~3861
- 8 Neal. A. Hall. Capacitive micromachined ultrasonic transducers with diffraction based integrated optical displacement detection [J]. *Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics, And Frequency Control*, 2003, **50**(11): 1570~1580
- 9 Wu Kang, Ye Xiongying, Liu Litao *et al.*. Interferometric detection method for micro-displacement based on integrated diffraction grating [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, **7**(1): 56~59
- 伍 康,叶雄英,刘力涛等. 集成光栅干涉微位移测量方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, **7**(1): 56~59
- 10 WookLee, A grating-assisted resonant cavity enhanced optical displacement detection method for micromachined sensors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(15): 3032~3034