

离面型双层亚波长光栅微位移传感系统研究

赵玉娇, 周震

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100089)

摘要:随着微电子机械系统(MEMS)惯性传感器件对微位移检测精度的要求越来越高,微位移检测技术已经成为惯性传感领域的研究热点,亚波长光栅的出现为微位移测量提供了一个全新的发展前景。以离面型双层亚波长光栅位移传感系统为研究对象,分别研究了亚波长光栅等周期与不等周期时系统的位移传感特性,利用 Rsoft 软件对 2 种结构中双光栅相对运动时系统透射率与光栅位移量之间的关系以及系统关键结构参数对位移检测灵敏度的影响规律进行模拟仿真,并对 2 种双光栅位移传感系统进行了结构优化设计与性能仿真,理论验证了离面型双层亚波长光栅位移传感系统结构的灵活性及方案的可行性。

关键词:亚波长光栅;倏逝波;微位移检测

中图分类号:TP212 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2019)12-0039-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on the micro displacement sensing system of off surface double-layer sub-wavelength grating

ZHAO Yujiao, ZHOU Zhen

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100089, China)

Abstract: With the higher and higher requirements of micro-electro-mechanical-systems (MEMS) inertial sensors for micro-displacement detection precision, micro-displacement detection technology has become a research hotspot in the field of MEMS inertial sensing. The emergence of sub-wavelength gratings provides a new development prospect for micro-displacement measurement. In this paper, the off surface double-layer sub-wavelength grating displacement sensing system is studied. The displacement sensing characteristics of the system of equal period and unequal period are studied. The relationship between the transmittance of diffracted light and the off surface double-layer displacement of the dual sub-wavelength gratings and the influences of the key structural parameters of the system on the sensitivity of the displacement detection are simulated by Rsoft software. The structure optimization and performances of the two dual grating micro-displacement sensing systems are simulated and compared. The high sensitivity advantage of sub-wavelength grating displacement detection is verified in theory.

Key words: sub-wavelength gratings; evanescent wave; micro-displacement detection

0 引言

亚波长光栅是指周期小于入射光波长的光栅结

收稿日期:2019-05-31。

基金项目:国家某重大项目 2 项。

作者简介:赵玉娇(1995-),女,河北衡水人,硕士生,主要研究方向是 MEMS 加速度计、MEMS 陀螺及亚波长光栅在 MEMS 惯性器件中的应用。曾参与“基于纳米光栅检测的新效应微机电陀螺机理研究”课题,完成陀螺系统设计、光学设计,微弱信号检测方案设计和样机结构设计;在实验室“基于微米光栅的光学加速度计”课题中,主要负责加计系统噪声抑制和有用信号提取,旨在提高加速度计测量精度。曾获得北航“二等奖学金”、“三等奖学金”和北航学生会“优秀学生干部”等荣誉。



构。近年来,亚波长光栅在位移传感领域中的高精度检测优势已引起越来越多研究者的关注^[1]。亚波长光栅位移传感系统通常由双层亚波长光栅组成。目前,已报道的双层亚波长光栅位移传感系统多基于共面型结构,即通过检测双层亚波长光栅相对共面运动引起的系统透射/反射光强的变化实现位移传感^[2-5]。这种共面型位移传感方式检测灵敏度高,已应用在微电子机械系统(MEMS)加速度计等多种基于位移检测的传感器中^[6-9]。但共面型双层光栅结构及工作方式灵活度较低、工作范围较低、工艺流程复杂、加工精度要求高和成品率低。相比于共面型双层亚波长光栅位移传感

系统,离面型双层亚波长光栅的结构及工作方式更为灵活,更易工艺实现^[10-12]。

本文以离面型双层亚波长光栅位移传感系统为研究对象,基于严格耦合波理论建立理论模型,重点分析等周期与不等周期双层亚波长光栅离面运动时系统光学特性与光栅垂直位移的关系,完成这2种离面型亚波长光栅位移传感系统的优化设计与性能仿真验证,并对其传感性能进行分析对比。

1 双层亚波长光栅位移传感系统结构及传感原理介绍

基于亚波长光栅的位移传感系统多采用双层光栅结构,如图1所示。该系统通常由下层固定亚波长光栅和上层可动亚波长光栅构成。按双层光栅的相对位移方向,可分为共面型与离面型。当光栅周期小于入射光波长时,单层亚波长光栅远场中只存在零级衍射光^[13],其它级次的光均以倏逝波的形式存在于光栅表面。对于共面型双层亚波长光栅位移传感系统,为实现位移的高检测灵敏度,上、下2层光栅需要设成等周期,因此只有零级衍射光可以用于位移传感。同时,共面型双层光栅结构特点及运动方式也决定了该传感系统的工作范围有限。

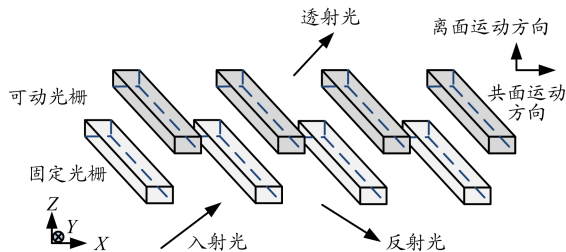


图1 双层亚波长光栅位移传感系统结构

相比于共面型双层亚波长光栅位移传感系统,离面型双层亚波长光栅位移传感系统的结构及工作方式更为灵活,双层光栅可设置成等周期,也可设置成不等周期。当双层光栅设置成等周期且处在近场光学耦合区时,离面型的位移传感机理同共面型,都是通过光栅间的相对位移改变系统的有效折射率,从而实现对零级衍射光强的调制。当双层亚波长光栅设置成不等周期且处在近场光学耦合区时,一个亚波长光栅会将另一个亚波长光栅表面以倏逝波形式存在的其它各级次衍射光耦合至远场,在远场中出现除零级之外的各衍射级次。此时,双层亚波长光栅的垂直位移将主要影响各级次衍射光的耦合效率,引起各级次衍射光远场光强随光栅垂直位移的变化。所以,除零级

衍射光外,其它级次的衍射光均可用于离面位移传感。此外,双光栅的离面运动方式也决定了该系统具有更大的工作范围。

2 离面型双层亚波长光栅位移传感

2.1 等周期系统结构优化设计与性能仿真

图2为离面型双层等周期亚波长光栅位移传感系统的CAD模型图。光栅采用氮化硅材料,折射率设为 $2-0.02i$,光栅周期 $P=0.6\text{ }\mu\text{m}$,光栅条宽度 $W=0.04\text{ }\mu\text{m}$,光栅条厚度 $D=0.33\text{ }\mu\text{m}$,初始垂直间距 $g=-0.33\text{ }\mu\text{m}$ ($g<0$ 表示上光栅的下表面低于下光栅的上表面)。TE偏振光垂直入射,波数取41。 X 方向模拟区域范围为 $-1.2\sim 1.8\text{ }\mu\text{m}$, Z 方向模拟区域范围为 $0\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ 。仿真输出为系统零级衍射光透射率。

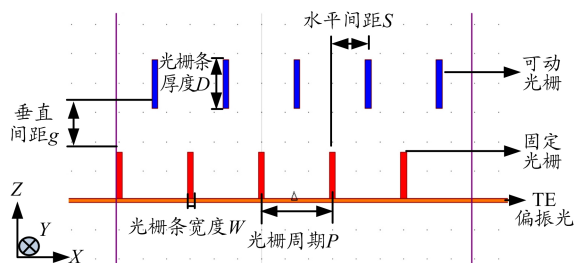


图2 离面型双层等周期亚波长光栅位移传感系统CAD模型

亚波长光栅存在导模共振现象,即当入射光波长、入射角及光栅参数满足谐振条件时,亚波长光栅的透射谱会出现谐振谷点^[14]。为实现高位检测灵敏度,系统的工作波长需选定为谐振波长。本文首先模拟了不同初始水平间距时双层亚波长光栅的零级衍射光透射光谱,发现不同初始水平间距对应不同的系统谐振波长。

本文选取不同的初始水平间距,根据相应的零级衍射光透射光谱依次确定系统谐振波长,并利用Rsoft模拟不同初始水平间距 S 下双层亚波长光栅零级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化曲线,如图3所示。

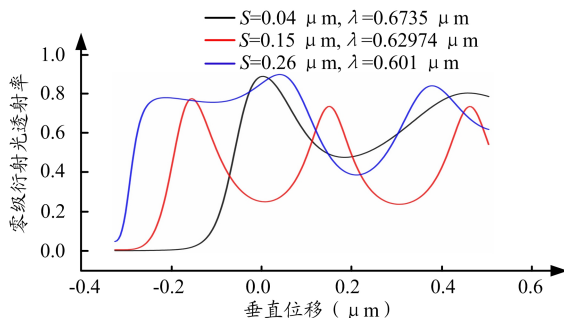


图3 不同初始水平间距下零级衍射光透射率随垂直位移的变化

从图3可知,双层光栅相对位置从相互共面交错($g=-0.33\text{ }\mu\text{m}$)开始,一定垂直位移范围内,零级衍射光透射率随光栅垂直位移的增大呈上升趋势。本文将该段曲线的斜率设为位移传感系统的位移检测灵敏度。当初始水平间距分别为 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.26\text{ }\mu\text{m}$ 时,系统垂直方向的位移检测灵敏度分别为 $0.66\%/nm$ 、 $0.84\%/nm$ 和 $0.92\%/nm$ 。在一定范围内($S\leq P/2-W$),初始水平间距越大,离面方向的位移检测灵敏度越高。因此,本文选定 $S=0.26\text{ }\mu\text{m}$,对应工作波长 $\lambda=0.601\text{ }\mu\text{m}$,位移检测灵敏度为 $0.92\%/nm$,工作范围为 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 。

初始水平间距优化后,在 $S=0.26\text{ }\mu\text{m}$ 下,本文模拟了不同初始垂直间距时双层亚波长光栅的零级衍射光透射光谱,发现不同初始垂直间距对应不同的系统谐振波长。本文选择相应的谐振波长作为工作波长,模拟不同初始垂直间距下双层亚波长光栅零级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化曲线,如图4所示。当初始垂直间距分别为 $-0.33\text{ }\mu\text{m}$ 、 $-0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 时,系统垂直方向的位移检测灵敏度分别为 $0.92\%/nm$ 、 $0.88\%/nm$ 、 $0.54\%/nm$ 和 $0.37\%/nm$ 。初始垂直间距越小,系统离面方向的位移检测灵敏度越高。因此,本文选择工作波长 $\lambda=0.601\text{ }\mu\text{m}$,此时初始垂直间距 $g=-0.33\text{ }\mu\text{m}$,初始水平间距 $S=0.26\text{ }\mu\text{m}$ 。

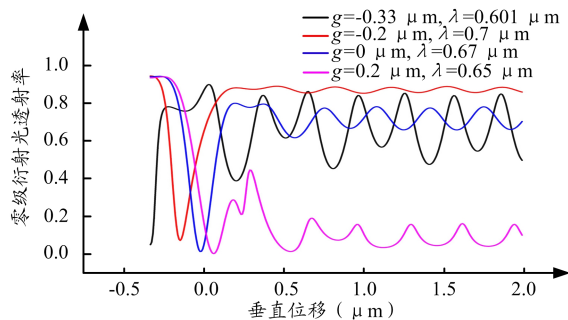


图4 不同初始垂直间距下零级衍射光透射率随垂直位移的变化

按照上述确定工作波长的方法,本文模拟了几组不同的光栅条宽度、厚度等结构参数在相应工作波长下的系统零级光透射率随光栅垂直位移的变化趋势,如图5所示。

从图5可以看出,在合适的结构参数下,只要工作波长选取得当,都可以得到零级衍射光透射率随光栅垂直位移变化的线性区,只是位移检测灵敏度和工作范围有差别。本文从上述几组结构参数中,选取位移检测灵敏度的最优值,结果如表1所示。在入射光

波长 $\lambda=0.601\text{ }\mu\text{m}$ 下,零级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化如图6所示。此时零级衍射光位移检测灵敏度约为 $0.923\%/nm$,该系统的工作范围为 $0.08\text{ }\mu\text{m}$ 。

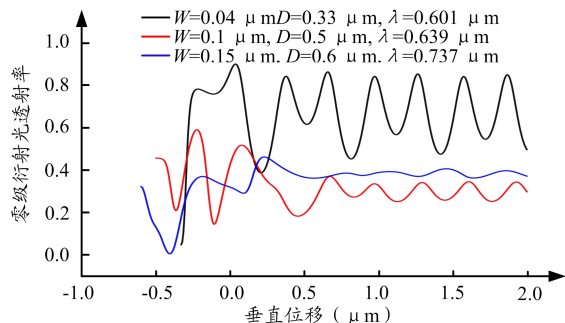


图5 不同结构参数下双层等周期亚波长光栅的

零级衍射光透射率随垂直位移的变化

表1 离面型双层等周期亚波长光栅位移传感系统优化结果

参数(单位)	数值	参数(单位)	数值
光栅周期 $P(\mu\text{m})$	0.6	入射光波长 $\lambda(\mu\text{m})$	0.601
光栅条宽度 $W(\mu\text{m})$	0.04	初始垂直间距 $g(\mu\text{m})$	-0.33
光栅条厚度 $D(\mu\text{m})$	0.33	初始水平间距 $S(\mu\text{m})$	0.26

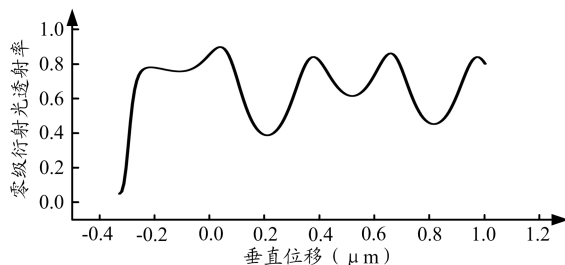


图6 优化后系统零级衍射光透射率随垂直位移的变化

较共面型双层亚波长光栅位移传感系统的位移检测灵敏度^[3],离面型双层等周期亚波长光栅位移传感系统位移检测灵敏度低了一个数量级以上,主要原因是双层亚波长光栅的耦合效率随垂直间距的增大而减小,因此系统有效折射率随位移的变化率不及共面运动。

2.2 不等周期系统结构优化设计与性能仿真

离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统采用硅-玻璃结构。图7为离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统的CAD模型图。上层光栅采用玻璃材料,折射率设为1.57,光栅周期 $P_1=1.2\text{ }\mu\text{m}$,光栅条宽度 $W_1=0.4\text{ }\mu\text{m}$,光栅条厚度 $D_1=0.6\text{ }\mu\text{m}$;下层光栅采用硅材料,折射率设为3.48,光栅周期 $P_2=1.0\text{ }\mu\text{m}$,光栅条宽度 $W_2=0.45\text{ }\mu\text{m}$,光栅条厚度 $D_2=0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。双层光栅初始垂直间距 $g=0\text{ }\mu\text{m}$,初始水平间距 $S=0\text{ }\mu\text{m}$ 。

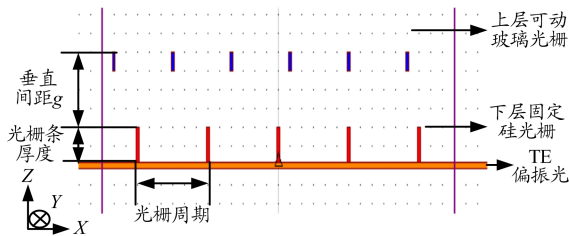


图7 离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统 CAD 模型

TE 偏振光垂直入射。此时,因双光栅处于近场耦合区,一个亚波长光栅会将另一个亚波长光栅中以倏逝波形式存在的其它各级次光耦合至远场,从而出现除零级外的各衍射级次。

2.2.1 一级衍射光透射特性分析与结构优化

本文首先模拟了近场范围内不同初始水平间距时,双层亚波长光栅的一级衍射光透射光谱,发现双层不等周期亚波长光栅的一级衍射光透射光谱中透射率会出现峰值点为实现离面位移的高检测灵敏度,将一级衍射光透射率最大处对应的波长选为工作波长。初始水平间距对一级衍射光透射率最大处的工作波长没有影响。在工作波长 $\lambda=1.5234\text{ }\mu\text{m}$ 下,模拟了不同初始水平间距时离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统一级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化,如图8所示。可以看出,在 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 的工作范围内,系统一级衍射光透射率随光栅垂直位移的增大呈下降趋势(可定义该段曲线的斜率为系统离面方向的位移检测灵敏度),初始水平间距对离面位移检测灵敏度的影响不大,综合考虑工艺条件等因素,本文选定初始水平间距 $S=0\text{ }\mu\text{m}$ 。

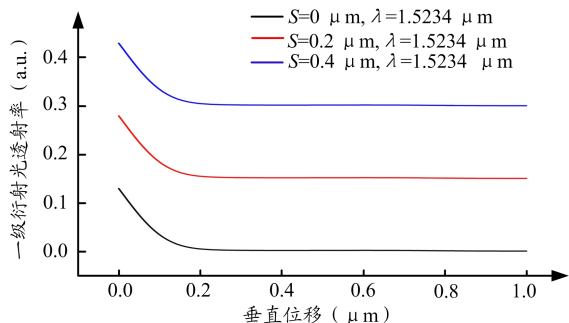


图8 不同初始水平间距下一级衍射光透射率随垂直位移的变化

然后,模拟了初始水平间距 $S=0\text{ }\mu\text{m}$ 时不同初始垂直间距下双层亚波长光栅的一级衍射光透射光谱,如图9所示。可以看出,不同的初始垂直间距对工作波长的影响不大,但对一级衍射光透射率影响较大,初始垂直间距越小,一级衍射光透射率越高。因此,本文

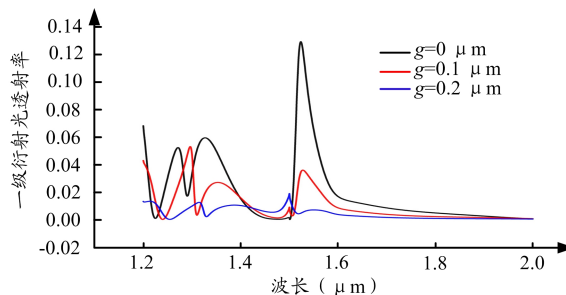


图9 不同初始垂直间距下
双层不等周期亚波长光栅的一级衍射光透射光谱

将初始垂直间距选在 $g=0\text{ }\mu\text{m}$ 处,并选择相应的一级光透射率最大处波长 $\lambda=1.5234\text{ }\mu\text{m}$ 作为工作波长。

按照上述确定工作波长的方法,本文模拟了几组不同的光栅条宽度、厚度等结构参数在相应工作波长下的系统一级光透射率随光栅垂直位移的变化趋势,如图10所示。

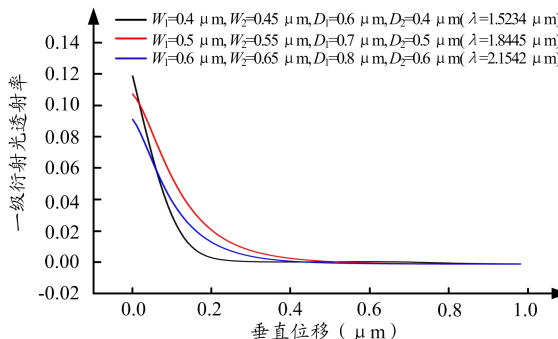


图10 不同结构参数下双层不等周期
亚波长光栅一级衍射光透射率随垂直位移的变化

由图10可知,在合适的结构参数下,只要工作波长选取得当,都可以得到一级衍射光透射率随光栅垂直位移变化的线性区,只是位移检测灵敏度和工作范围稍有差别。从上述几组结构参数中选取位移检测灵敏度的最优值时的参数,结果如表2所示。在入射光波长 $\lambda=1.5234\text{ }\mu\text{m}$ 下,一级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化如图11所示。此时一级衍射光位移检测灵敏度约为 $0.081\%/nm$,该系统的工作范围为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 。

表2 离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统优化结果

参数(单位)	数值	参数(单位)	数值
上层光栅周期 $P_1(\mu\text{m})$	1.2	下层光栅周期 $P_2(\mu\text{m})$	1
上层光栅条宽度 $W_1(\mu\text{m})$	0.4	下层光栅条宽度 $W_2(\mu\text{m})$	0.45
上层光栅条厚度 $D_1(\mu\text{m})$	0.6	下层光栅条厚度 $D_2(\mu\text{m})$	0.4
初始水平间距 $S(\mu\text{m})$	0	初始垂直间距 $g(\mu\text{m})$	0

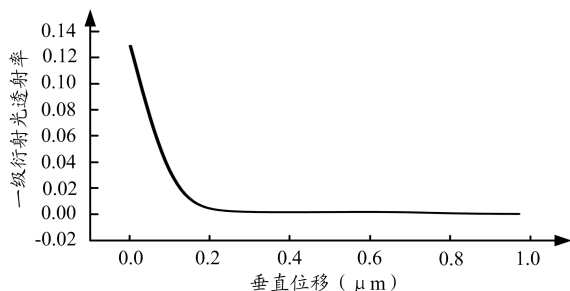


图 11 优化后系统一级衍射光透射率随垂直位移的变化

2.2.2 零级衍射光透射特性分析与结构优化

以优化后的一级衍射光离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统为模拟对象,本文模拟了不同初始水平间距时双层亚波长光栅的零级衍射光透射光谱,发现在零级衍射光透射光谱中会出现谐振谷点。为实现离面位移的高检测灵敏度,选择谐振谷点处对应的波长作为工作波长,且双层光栅的初始水平间距对工作波长没有影响,均为 $\lambda=1.516 \mu\text{m}$ 。

在工作波长 $\lambda=1.516 \mu\text{m}$ 下,本文模拟了不同初始水平间距时离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统零级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化,如图 12 所示。在 $0.2 \mu\text{m}$ 的工作范围内,系统零级衍射光透射率随光栅垂直位移的增大呈上升趋势(定义该段曲线的斜率为系统离面位移的位移检测灵敏度),初始水平间距对离面位移检测灵敏度的影响不大,综合考虑工艺条件等因素,本文选定初始水平间距 $S=0 \mu\text{m}$ 。

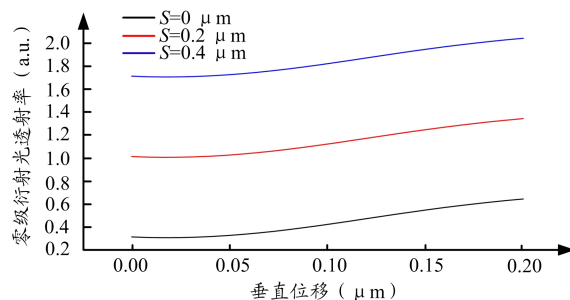


图 12 不同初始水平间距下零级衍射光透射率随垂直位移的变化

初始水平间距确定后,本文模拟了近场范围内不同初始垂直间距时双层亚波长光栅的零级衍射光透射光谱,发现系统谐振波长集中在 $\lambda=1.516 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 左右。

本文模拟了这 2 种工作波长下双层亚波长光栅零级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化曲线,模拟结果如图 13 所示。可以看出,当工作波长分别为 $\lambda=1.516 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=1.5 \mu\text{m}$ 时,系统垂直方向的位移检

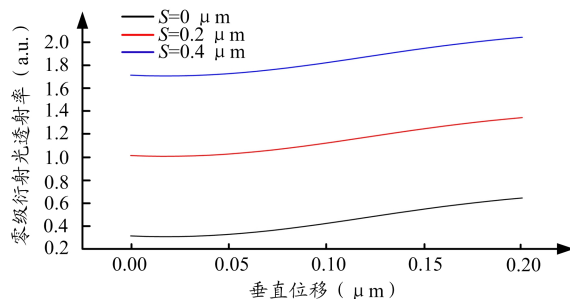


图 13 2 种不同工作波长下零级衍射光透射率随垂直位移的变化

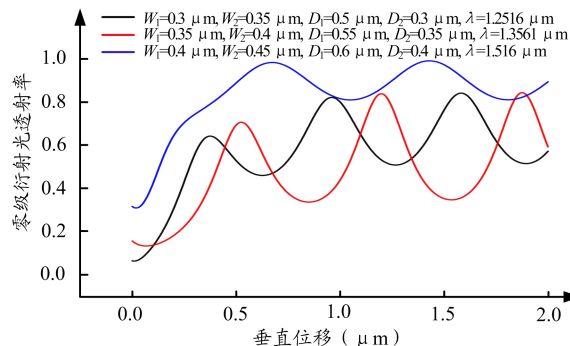


图 14 不同结构参数下双层不等周期亚波长光栅的零级衍射光透射率随垂直位移的变化

测灵敏度分别为 $0.171\%/nm$ 、 $0.104\%/nm$,工作范围分别为 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 。因此,选定工作波长 $\lambda=1.516 \mu\text{m}$,初始垂直间距 $g=0 \mu\text{m}$ 。

按照上述确定工作波长的方法,本文模拟了几组不同的光栅条宽度、厚度等结构参数在相应工作波长下的系统零级光透射率随光栅垂直位移的变化趋势,如图 14 所示。可以看出,在合适的结构参数下,只要工作波长选取得当,都可以得到零级衍射光透射率随光栅垂直位移变化的线性区,只是位移检测灵敏度和工作范围有差别。从上述几组结构参数中选取位移检测灵敏度的最优值,结果如表 3 所示。在入射光波长 $\lambda=1.516 \mu\text{m}$ 下,零级衍射光透射率随光栅垂直位移的变化如图 15 所示。此时零级衍射光位移检测灵敏度约为 $0.12\%/nm$,该系统的工作范围为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

从图 15 还可以看出,当垂直位移大于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,离面型双层亚波长光栅的位移检测灵敏度变低,但其透射率随垂直位移出现规律性波动。图 16 给出了当垂直位移大于 $0.7 \mu\text{m}$ 时零级衍射光透射率随垂直位移的变化。此时系统零级衍射光透射率随光栅垂直位移呈余弦变化,且变化周期为 $\lambda/2$ 。因此,此时透射光由两光栅零级衍射光干涉形成,工作原理与两微米光栅干涉相同。

表 3 离面型双层不等周期亚波长光栅微位移传感系统优化结果

参数(单位)	数值	参数(单位)	数值
上层光栅周期 $P_1(\mu\text{m})$	1.2	下层光栅周期 $P_2(\mu\text{m})$	1
上层光栅条宽度 $W_1(\mu\text{m})$	0.3	下层光栅条宽度 $W_2(\mu\text{m})$	0.35
上层光栅条厚度 $D_1(\mu\text{m})$	0.5	下层光栅条厚度 $D_2(\mu\text{m})$	0.3
初始水平间距 $S(\mu\text{m})$	0	初始垂直间距 $g(\mu\text{m})$	0

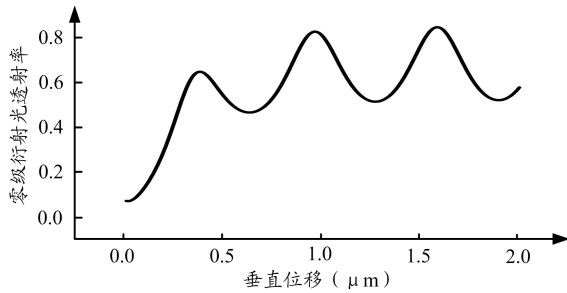


图 15 优化后系统零级衍射光透射率随垂直位移的变化

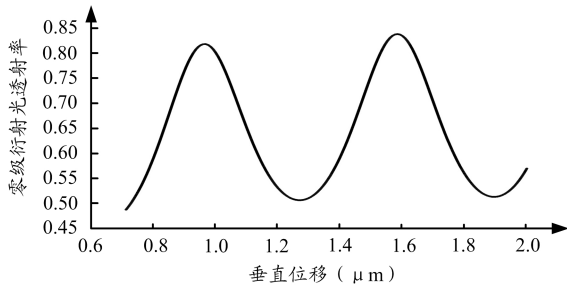


图 16 零级衍射光透射率随垂直位移的变化

综上所述,对于离面型双层亚波长光栅位移传感系统,双层光栅可设置成等周期,也可设置成不等周期。对于等周期双层亚波长光栅,只有零级衍射光可用于位移传感,较共面型位移传感系统,离面型位移传感系统灵敏度低了一个数量级以上。对于不等周期双层亚波长光栅,在近场范围内,零级与一级衍射光均可用于位移传感。相比之下,零级衍射光透射率更高、位移检测灵敏度更高、工作范围也更大,更适合用于位移传感。

3 结束语

本文利用 Rsoft 软件对等周期、不等周期 2 种离面型双层亚波长光栅位移传感系统的透射率及位移检测灵敏度进行仿真对比分析,完成了系统结构的优化设计与性能验证。优化后的离面型双层等周期亚波长光栅位移传感系统的位移检测灵敏度约为 0.923%/nm,离面型双层不等周期亚波长光栅位移传感系统的位移检测灵敏度约为 0.12%/nm。

本文设计的 2 种亚波长光栅位移传感系统均可应用在 MEMS 惯性器件中。目前,亚波长光栅位移传

感结构已显现出明显的精度优势。针对亚波长光栅光学特性及其在微位移检测方面的研究,对推动亚波长光学元件在高端商用和军事领域应用等方面的新一代光学系统的发展,以及微位移检测技术水平的提高,具有重要的应用价值与理论意义。

参考文献:

- [1] CHEBEN P, HALIR R, SCHMID J H, et al. Subwavelength integrated photonics [J]. Nature, 2018, 560(7720): 565–572.
- [2] CARR D W, SULLIVAN J P, FRIEDMANN T A. Laterally deformable nanomechanical zeroth-order gratings: anomalous diffraction studied by rigorous coupled-wave analysis [J]. Optics Letters, 2003, 28 (18): 1636–1638.
- [3] CARR D W, KEELER B E N, SULLIVAN J P, et al. Measurement of a laterally deformable optical MEMS grating transducer [J]. Proc Spie, 2004, 5346: 56–63.
- [4] KEELER B E N, CARR D W, SULLIVAN J P, et al. Experimental demonstration of a laterally deformable optical nanoelectromechanical system grating transducer[J]. Optics Letters, 2004, 29(11): 1182–1184.
- [5] KEELER B E, BOGART G R, CARR D W. Laterally deformable optical NEMS grating transducers for inertial sensing applications [J]. Proc Spie, 2005(5592): 306–312.
- [6] OLSSON R H, KEELER B E N, CZAPLEWSKI D A, et al. Circuit Techniques for Reducing Low Frequency Noise in Optical MEMS Position and Inertial Sensors [C]// the IEEE International Symposium on Circuits & Systems, May 6–9, 2007, Albuquerque, USA. Albuquerque: Los Alamitos, 2007.
- [7] KRISHNAMOORTHY U, OLSSON R H, BOGART G R, et al. In-plane MEMS-based nano-g accelerometer with sub-wavelength optical resonant sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 145-146: 283–290.
- [8] YAO B Y, ZHEN Z, FENG L S, et al. Structural Design of a Compact in-Plane Nano-Grating Accelerometer [J]. Chinphyslett, 2012, 29 (11): 1185021–1185025.
- [9] CHEN W, QIANBO L, JIAN B, et al. Highly sensitive lateral deformable optical MEMS displacement sensor: anomalous diffraction studied by rigorous coupled-wave analysis [J]. Applied Optics, 2015, 54 (30): 8935–8943.
- [10] ROGERS A A A. Evanescent Wave Coupling Using Different Subwavelength Gratings for a MEMS Accelerometer [C]. University of South Florida: Dissertations & Theses - Gradworks, 2011.
- [11] ROGERS A A A, KEDIA S, SAMSON S, et al. Verification of evanescent coupling from subwavelength grating pairs [J]. Applied Physics B, 2011, 105(4): 833–837.
- [12] LI M, WANG Z, GENG H, et al. Structural design and simulation of a micro-gyroscope based on nano-grating detection [J]. 2019, 25 (5): 1627–1637.
- [13] 巴音贺希格,齐向东,唐玉国.位相光栅色散特性的矢量衍射理论分析[J].物理学报,2003,52(5):1157–1161.
- [14] WOOD R W. On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum[J]. Philosophical Magazine, 1902, 4(21): 396–402.