光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20240918001

基于相位掩模板法二阶光栅刻写及传感特性研究

杨 铎[1,2], 廖晶晶[1,2], 黎琪慧[1,2], 杨忠旭[1,2], 辛璟焘[1,2,3]*

(1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100192; 2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016; 3. 广州南沙光子感知技术研究院, 广州 511462)

摘 要: 为将光纤光栅传感系统的工作波段拓展至硅基探测器适用的近红外波段,采用1 550 nm波段的相位掩模板进行780 nm波段的二阶光栅刻写研究。首先,分析了二阶光栅的成栅机理,并搭建紫外激光-相位掩模的刻写系统制备了二阶光栅。研究结果表明,二阶光栅的中心波长与一阶中心波长呈近似二倍关系,并且二阶波长的带宽较窄。随后,利用刻写的光栅封装了应变传感器和温度传感器,并系统研究了其温度和应变特性。结果表明,二阶波长的温度灵敏度和应变灵敏度分别为5.52 pm/℃和0.61 pm/με,约为一阶波长灵敏度的一半。本研究为拓展光纤传感的工作波长范围及硅基探测器的应用提供了技术支持。

关键词: 二阶光栅; 相位掩模板; 折射率调制; 光纤传感; 解调系统

中图分类号: TN253;TN247 **文章编号:** 1001－5868(2025)02－0374－07

Second-Order Grating Inscribing and Sensing Characteristics Based on Phase Mask

YANG Duo[1,2], LIAO Jingjing[1,2], LI Qihui[1,2], YANG Zhongxu[1,2], XIN Jingtao[1,2,3]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN; 3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, CHN)

Abstract: To extend the operational range of the fiber grating sensing system into the near-infrared band accessible to silicon-based detectors, this study applies a phase mask to the 1 550 nm waveband for second-order Bragg grating inscription research on the 780 nm waveband. First, the formation mechanism of the second-order grating is analyzed, and then a grating-inscribing system is integrated with an ultraviolet laser equipped with a phase mask grating to fabricate the second-order FBG. The ratio of the first-order wavelength to the second-order wavelength was found to be 1.98, and the bandwidth of the second-order wavelength is narrower. The results indicate that the temperature and strain sensitivities of the second-order grating are 5.28 pm/℃ and 0.65 pm/με, respectively, or approximately half the first order grating. This research provides technical support for expanding the range of the optical fiber sensing system and the waveband of the silicon-based detector.

Key words: second-order grating; phase mask; refractive index modulation; fiber optic sensing; demodulation system

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)作为一种新型传感元件,凭借其抗电磁干扰、分布式参数测量、体积小以及耐腐蚀等优点[1],已在航空

收稿日期:2024－09－18.

*通信作者:辛璟焘

航天、石油化工、桥梁隧道等领域得到广泛应用[2-4]。光纤光栅传感器主要工作于光通信的O波段(1 260～1 360 nm)[5-6]与C＋L波段(1 530～1 625 nm)[7-8],这些波段使用到的探测器如PD和线阵CCD等通常以铟镓砷材料为基底[9]。然而,以硅材料为基底的光电探测器应用广泛、制作工艺成熟,同时具有更快的响应速度。若能将光纤光栅传感器的工作波段扩展至硅基探测器的响应范围,将大幅提升解调速度和解调成本,具有重要的工程应用价值。

为实现硅基光电探测器在光纤传感领域的应用,需要研制工作波长更短的光纤光栅传感器。光纤光栅的刻写常采用飞秒逐点法[10-11]和紫外激光-相位掩模的方法[12-14]。前者因聚焦光斑尺寸较大,无法满足硅基波段一阶光栅的刻写需求;而紫外激光-相位掩模法凭借周期准确、稳定性好的优点成为更优选择。传统方法多采用1 550 nm波段的相位掩模板刻写一阶光栅,本研究使用同一掩模板刻写780 nm波段的二阶光栅,成功将光纤传感的波段扩展至硅基探测器波段。

本文基于相位掩模法搭建了紫外激光刻写系统,分析了二阶光栅的成栅机理,并通过优化刻写参数制备出高性能二阶光栅。进一步封装了应变与温度传感器,实验验证了其传感特性。结果表明,二阶光栅的灵敏度系数与理论预测一致,且可通过一阶与二阶波长的灵敏度差异实现温度与应变的同步测量。该研究为光纤传感系统与硅基探测器的集成提供了关键技术支撑。

1　光栅理论分析及制备

相位掩模板法刻写光栅是通过紫外曝光相位掩模板使纤芯内折射率发生永久性周期变化,从而只反射满足布拉格条件的光。布拉格条件公式为:

$$\lambda_m=\frac{2}{m}n_{\mathrm{eff}}\Lambda(m=1,2,3,\cdots) \tag{1}$$

式中,λ_m为光纤光栅第m阶的波长,m指光栅反射波长的阶数;n_{eff}为纤芯有效折射率;Λ为光栅的栅格周期。令m=2,计算出二阶中心波长。

掺锗光纤中的光致折射率变化与掺杂导致的缺氧缺陷相关,然而,由于光纤中掺锗浓度有限,光纤中的光致折射率不会随曝光时间无限增大,而是会达到一个饱和值。假设光栅的纤芯折射率沿轴向x均匀分布,光栅中的纤芯折射率可表示为[15]:

$$n(x)=n_{\mathrm{co}}+\Delta n_m n_d(x) \tag{2}$$

式中,n_{co}为曝光前的纤芯折射率,Δn_m为光致折射率的饱和值,$n_d(x)$为折射率变化函数,将$n_d(x)$按照傅利叶级数展开,可以得到:

$$n_d(x)=G_0+\sum_{n=1}^{\infty}G_n\cos\left(n\frac{2\pi}{\Lambda}x\right) \tag{3}$$

一阶衍射的光致扰动量δ_{n1}和二阶衍射的光致扰动量δ_{n2}分别为:

$$\delta_{n1}=\Delta n_m G_1 \tag{4}$$

$$\delta_{n2}=\Delta n_m G_2 \tag{5}$$

由以上分析可知,G_0主要影响布拉格光栅的中心波长,而G_2主要影响二阶光栅的反射率和反射带宽。将光栅的折射率分布视为余弦函数,只有当光致折射率引发饱和效应时,折射率分布才会偏离标准余弦函数,从而导致二阶的衍射效应。

光纤的材料主要是SiO_2,由于色散的影响,SiO_2的折射率受波长变化影响,二阶和一阶中心波长并非准确呈二倍关系。SiO_2的色散公式为:

$$n^2-1=\frac{0.696\,166\,3\lambda^2}{\lambda^2-0.068\,404\,3^2}+\frac{0.407\,942\,6\lambda^2}{\lambda^2-0.116\,241\,4^2}+\frac{0.897\,479\,4\lambda^2}{\lambda^2-9.896\,161^2} \tag{6}$$

式中,n为SiO_2的折射率,λ为SiO_2中传播光的波长。根据公式(6)绘制的折射率随波长变化曲线如图1所示[16]。

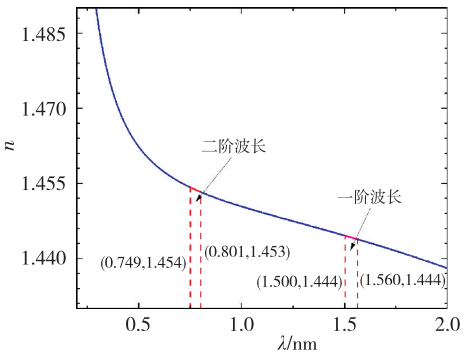


图1　SiO_2色散曲线图

由公式(6)可知,随着光纤中传输光的波长增大,折射率会缓慢下降,在1 550 nm波段的折射率约为1.443 9,对应二阶波长780 nm波段的折射率约为1.453 7。在图1中标注出波长范围在750～780 nm,1 550～1 560 nm的折射率变化情况。

搭建的二阶光栅光谱刻写系统如图2所示。刻写过程中使用日本横河AQ6370D光谱仪监测二阶波长,其具有600～1 700 nm的波长范围及0.02 nm的分辨率。光源选用SuperLum的超辐射发光二极

管SLD，并设有驱动模块控LDTC0520制电流来保证SLD输出功率稳定，用光环行器来对光源起到隔离保护的作用。激光器发出的脉冲光，经过空间滤波和相位掩模板后辐照在去除涂覆层的光纤上。

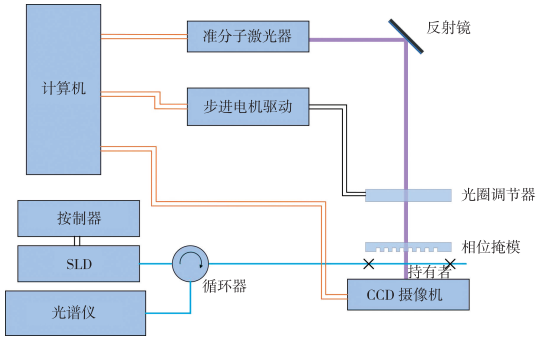


图2 二阶光栅刻写系统结构图

在实验中，使用光阑设定栅长度为10 mm，同时选用不同相位掩模板，其周期分别为530.35，531.73，537.24和544.14 nm。此外，对三种光纤进行了测试：普通的掺锗单模光纤SMF-28e、单模光纤HI-1060和单模光纤HP-780。最终发现前两种光纤的截止波长偏大，导致未能观测到二阶中心波长，只有HP-780的光纤可以观测到二阶波长的反射峰。基于该发现，后续实验中的二阶光栅所用光纤均为HP-780。

在光栅刻写过程中中心波长出现的微小红移，源于曝光时间的增加使平均有效折射率逐渐增大，从而引起中心波长红移。期间为获得高反射率二阶光栅并缩短刻写时间，增大了准分子激光器的脉冲能量，结果发现光栅谱性变差，光谱不对称并且旁瓣增大。因此要选用合适的激光能量和曝光时间来刻写二阶光栅。

刻写完成后，使用切趾光阑改变栅区的折射率分布，从而使反射峰的谱形更靠近高斯形，进而抑制光谱中旁瓣的影响。切趾后选取一个光栅反射谱和透射谱如图3所示，计算得出该光栅的反射率为59.92%。将一阶和二阶中心波长的位置与带宽进行对比。整理得到的一阶波长与二阶波长参数如表1所示，计算出一阶与二阶中心波长之比为1.983，与理论值1.987接近。如图4为一二阶中心波长的光谱，可以看出一阶波长光谱图呈现出饱和的“平顶”形，并且旁瓣明显，而对应的二阶波长谱形接近高斯形；还可以看出一阶波长带宽为0.249 nm，而二阶波长的带宽仅为0.055 nm。此外，在观测一阶波长时，因光纤耦合模式不匹配，传输损耗大，光谱强度本身不稳定而且一旦受到轻微的扰动，反射光谱就会出现明显的抖动。

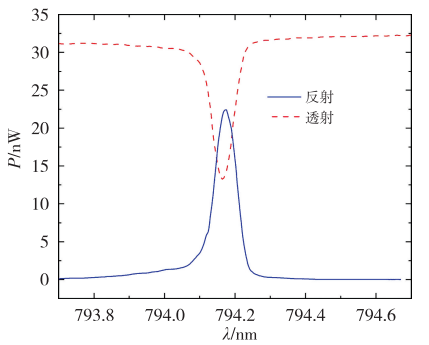
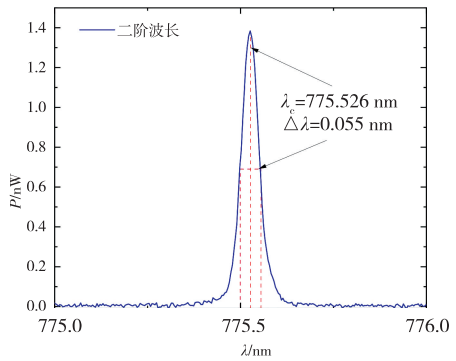


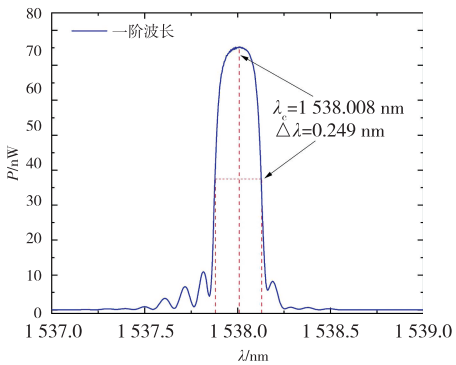
图3 二阶光栅反射谱和透射谱

表1 一阶波长与二阶波长参数对比

相位掩模板周期/nm	一阶波长参数/nm		二阶波长参数/nm	
	中心波长	带宽	中心波长	带宽
530.35	1 538.01	0.25	775.53	0.05
531.73	1 541.10	0.27	777.70	0.08
537.24	1 557.13	0.30	785.87	0.06
544.14	1 573.75	0.55	794.64	0.07



（a）二阶波长



（b）一阶波长

图4 一阶与二阶中心波长的光谱

光栅在刻写前通过载氢来增加光纤的光敏性，刻写后光纤中未发生反应的氢分子和不稳定的Ge-OH键造成光纤光栅的光学特性变差，导致实际应用中测量精度下降，因此需要对光纤进行退火处理，

将刻好的光栅放在80℃的温箱中退火24～48 h,退火前后的的波形对比如图5所示。从图中能明显看到中心波长与反射率的下降。

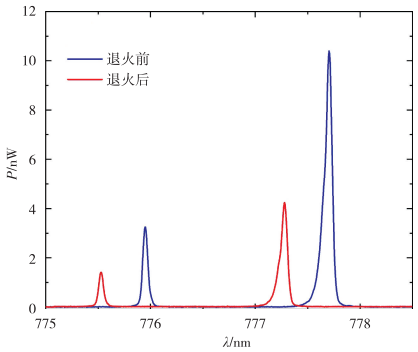


图5　退火前后二阶光栅反射谱对比

为确定780 nm波段的二阶光栅光谱参数的平均变化量,首先计算了所刻写光栅的3 dB带宽和反射率,随后将退火前后的光谱参数变化整理于表2中。由表2数据可以得出,780 nm波段二阶波长退火后平均下降0.436 nm,且反射率也略有下降。二阶波长3 dB带宽本身较窄,因此带宽变化不明显。

表2　退火前后二阶光栅参数变化

光谱参数	退火前	退火后	变化量
中心波长/nm	775.948～794.630	775.526～794.174	−0.436
3 dB带宽/nm	0.052～0.128	0.052～0.118	−0.002
反射率/%	11.5～59.92	9.74～57.05	−1.96

2　二阶光栅传感特性研究

光纤光栅的中心波长漂移量与温度和应力应变有关,中心波长漂移量$\Delta\lambda_m$等于周期变化量$\Delta\Lambda$和有效折射率变化量Δn_{eff}两部分的叠加,对应关系如公式(7)所示。因此要对光栅的传感特性进行研究,得出温度灵敏度和应变灵敏度。其中,应变灵敏度系数$K_\varepsilon=1-P_e=1-n_{\mathrm{eff}}^2\times[P_{12}-\nu(P_{11}+P_{12})]/2$,$P_e$为石英的有效弹光系数。一阶温度灵敏系数$K_T=\alpha+\xi$,其中光纤材料的热膨胀系数$\alpha=\mathrm{d}L/(L\times\mathrm{d}T)$,热光系数$\beta=\mathrm{d}n/(n\times\mathrm{d}T)$。

$$\Delta\lambda_m=\frac{2}{m}(n_{\mathrm{eff}}\Delta\Lambda+\Delta n_{\mathrm{eff}}\Lambda)=\frac{2}{m}[n_{\mathrm{eff}}(\alpha\Lambda\cdot\Delta T+\Lambda\cdot\varepsilon)+(\xi n_{\mathrm{eff}}\cdot\Delta T-nP_e\cdot\Delta\varepsilon)\Lambda]=\lambda_m(K_\varepsilon\cdot\Delta\varepsilon+K_T\cdot\Delta T)\tag{7}$$

当λ_1=1 550 nm时,理论求得一阶波长的温度灵敏度和应变灵敏度为11.19 pm/℃和1.22 pm/με;当λ_2=780 nm时,二阶波长的温度灵敏度和应变灵敏度为5.63 pm/℃和0.61 pm/με。下面对二阶波长的灵敏度进行验证。

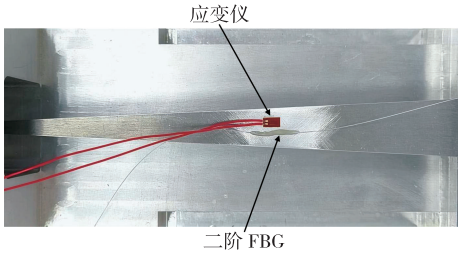
2.1　应变特性测试

二阶光栅的温度灵敏度是对温度的响应程度,只考虑轴向应变的变化量$\Delta\varepsilon$时,光栅的中心波长相对变化量$\Delta\lambda/\lambda$取决于弹光系数P_ε和轴向应变变化量$\Delta\varepsilon$,即:

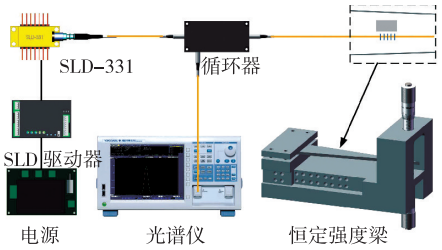
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=(1-P_\varepsilon)\times\Delta\varepsilon\tag{8}$$

使用等强度悬臂梁搭建二阶光栅的应变灵敏度测试系统,采用表贴式封装将二阶光栅粘贴到悬臂梁表面。封装前用砂纸打磨粘贴区并用酒精擦拭。封装时用胶黏剂将光栅和电阻应变片粘贴至悬臂梁表面,使应变片和二阶光栅的位置关于悬臂梁中轴线对称。封装完成后将传感器在25℃室温下固化48 h,固化完成后开始进行应变的测量。

使用晶明JM5945应变仪采集微应变,最小分辨可达0.5 με,并设有一个温度补偿件在邻近位置,使用AQ6370D读出二阶光栅的中心波长。二阶光栅封装和应变灵敏度测试系统如图6所示。



(a) 二阶光栅封装



(b) 应变灵敏度测试系统

图6　二阶光栅封装和应变灵敏度测试系统

在25℃环境下测试二阶光栅的应变响应曲线,旋转悬臂梁的微分头产生0～400 με范围的微应变,同时测试一阶中心波长的应变灵敏度与二阶波长进行对比。进行了三轮测试验证灵敏度的一致性,由测试数据绘制二阶波长与一阶波长应变特性曲线如图7和8所示。

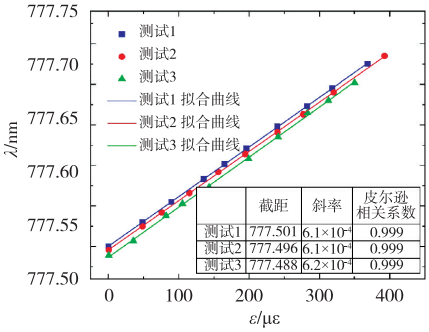


图7 二阶中心波长应力实验拟合曲线

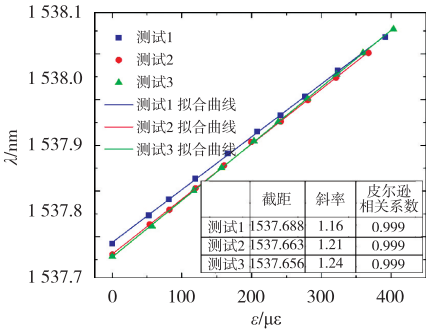


图8 一阶中心波长应力实验拟合曲线

由图中可以看出二阶和一阶波长漂移量和应力变化呈线性关系，拟合的线性度可达0.999，三次实验有较好的重复性，波长稳定性$\Delta\lambda$=0.02 nm，灵敏度误差为4.03%。计算出二阶与一阶中心波长的平均应变灵敏度为0.61与1.20 pm/με，近似二倍关系。两个波长对轴向应变响应的拟合方程计算如公式(9)和(10)所示：

$$Y=1\,537.669+0.001\,20\varepsilon \tag{9}$$

$$Y=775.495+0.000\,61\varepsilon \tag{10}$$

式中，ε为当前测量的轴向微应变值，Y为光纤光栅的中心波长。

2.2 温度特性测试

只考虑光栅所处环境温度变化ΔT，对应光纤光栅中心波长相对漂移量如公式(11)所示：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=(\alpha_f+\xi_f)\times\Delta T \tag{11}$$

式中，α_f为光纤的热膨胀系数，ξ_f为光纤的热光系数。使用高精度油浴槽(Julabo FK30-SL)搭建温度灵敏度测试系统，温度稳定性为0.01℃。用两点粘贴封装将二阶光栅制成温度传感器进行灵敏度响应测试，如图9所示。

升温过程中铜壳会受热膨胀拉长光纤引起中心波长的漂移对实验造成干扰，因此需将栅区略微弯曲一个弧度。二阶光栅封装实物如图10所示。

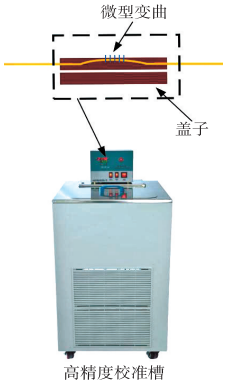


图9 温度灵敏度测试系统

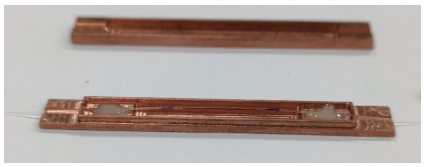


图10 二阶光栅温度传感器封装实物照片

首先固定栅区两端产生微弯的弧度，使用环氧树脂胶将光纤封装在铜壳上预留的粘贴点处，常温固化48 h后，将传感器放入80℃高温箱中退火24 h，退火完成后进行温度测试。设置灵敏度测试范围为30～60℃，使用光谱仪AQ6370D读出二阶光栅的中心波长。为对比二阶与一阶波长的灵敏度差异，对温度传感器一阶波长温度灵敏度进行测试，所测数据绘制的曲线如图11和12所示。此外，还进行了三轮测试，以验证温度灵敏度的一致性。

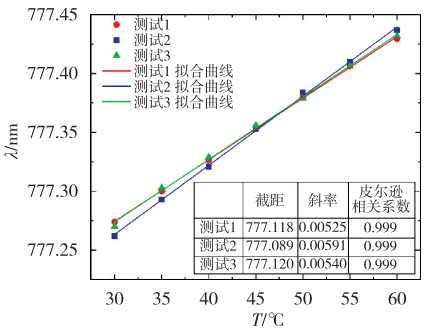


图11 二阶中心波长温度试验拟合曲线

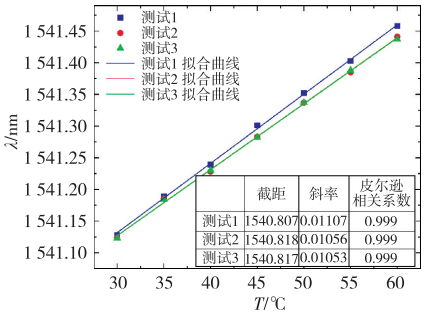


图12 一阶中心波长温度实验拟合曲线

从图中可以看出，二阶光栅的中心波长漂移量和温度变化呈线性关系，线性度可达0.999，波长稳定性$\Delta\lambda$=0.08 nm，灵敏度误差为8.07%。二阶与一阶中心波长的温度灵敏度分别为10.72和5.52 pm/℃，一阶与二阶波长温度灵敏度近似二倍关系。对温度响应的拟合方程如公式(12)和(13)所示：

$$Y=1\,540.814+0.010\,72T \tag{12}$$

$$Y=777.109+0.005\,52T \tag{13}$$

式中，T为当前测量温度值，Y为当前二阶光栅的中心波长。

经过上述灵敏度测试可以得出一阶和二阶波长的温度灵敏度和应变灵敏度系数，利用其中的灵敏度差异实现单个光栅的温度与应变同时测量。已知一阶与二阶波长漂移量$\Delta\lambda_1/\lambda_1$和$\Delta\lambda_2/\lambda_2$，可得到双波长矩阵如公式(14)所示：

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_1/\lambda_1\\ \Delta\lambda_2/\lambda_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}K_{\varepsilon1} & K_{T1}\\ K_{\varepsilon2} & K_{T2}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta\varepsilon\\ \Delta T\end{bmatrix} \tag{14}$$

将测试得到的温度灵敏度和应变灵敏度系数代入公式(14)中，可得到公式(15)的双波长矩阵，通过一阶与二阶相对波长漂移量，求解温度变化量ΔT与应变变化量$\Delta\varepsilon$，从而实现单个光栅同时测量温度与应变。

$$\begin{bmatrix}\Delta\varepsilon\\ \Delta T\end{bmatrix}=\frac{1}{0.084\,8}\begin{bmatrix}5.52 & -10.72\\ -0.61 & 1.20\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta\lambda_1/\lambda_1\\ \Delta\lambda_2/\lambda_2\end{bmatrix} \tag{15}$$

3　结论

本文基于紫外激光-相位掩模法成功制备二阶光栅，实现光纤传感工作波长向硅基探测器适用波段的拓展。经过理论分析与实验验证，得出以下结论：二阶光栅的中心波长与一阶波长呈近似两倍关系；二阶光栅的一阶和二阶波长的温度灵敏度分别为10.72和5.52 pm/℃，应变灵敏度分别为1.20和0.61 pm/με；利用一阶与二阶波长的灵敏度系数构建的双波长矩阵，可以实现单个光栅同时测量温度与应变。本研究利用1 550 nm相位掩模板直接刻写780 nm波段二阶光栅，突破了传统方法对短波光栅制备的限制。通过硅基探测器解调二阶波长信号，可充分发挥其响应速度快、成本低、工艺成熟的优点，为光纤传感技术在工业监测、生物医疗等领域的规模化应用提供了关键技术支撑。后续研究将重点优化二阶光栅的退火工艺与封装可靠性，进一步提升其长期稳定性。

参考文献：

[1] 苑立波，童维军，江　山，等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报，2022，42(1)：9-42.
Yuan Libo，Tong Weijun，Jiang Shan，et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica，2022，42(1)：9-42.

[2] 孙利民，蔡海文. 采用光纤光栅及无线智能传感技术的桥梁结构健康监测系统研究取得重要进展[J]. 中国激光，2006，33(1)：96.
Sun Limin，Cai Haiwen. Important progress has been made in the research of bridge structure health monitoring system using fiber grating and wireless intelligent sensing technology[J]. Chinese Journal of Lasers，2006，33(1)：96.

[3] 李婧怡，朱振华. 光纤光栅传感技术在航空航天领域中的应用与发展[J]. 中国新通信，2018，20(4)：67-69.
Li Jingyi，Zhu Zhenhua. Application and development of fiber grating sensing technology in aerospace field[J]. China New Telecommunications，2018，20(4)：67-69.

[4] 常天英，陈　星，于　淼，等. 基于有限元仿真和光纤传感的隧道损伤监测[J]. 红外与激光工程，2024，53(5)：191-205.
Chang Tianying，Chen Xing，Yu Miao，et al. Tunnel damage detection based on finite element simulation and optical fiber sensing[J]. Infrared and Laser Engineering，2024，53(5)：191-205.

[5] 李政颖，周祖德，童杏林，等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报，2012，32(3)：60-65.
Li Zhengying，Zhou Zude，Tong Xinglin，et al. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. Acta Optica Sinica，2012，32(3)：60-65.

[6] Cibira G，Glesk I，Dubovan J. Dynamic bandwidth allocation for C-band shared FBG sensing and telecommunications[J]. IEEE Internet of Things Journal，2022，9(22)：23272-23284.

[7] Naim N F，Ab-Rahman M S，Bakar A A A. Passive optical access network monitoring using L-band ASE source with fiber Bragg grating [C]// 2013 IEEE Student Conference on Research and Developement，2013：516-519.

[8] Hsu H Y，Yu Y L，Liaw S K，et al. Theoretical and experimental study of multifunction C+L band hybrid fiber amplifiers [J]. Optics & Laser Technology，2014，56：307-312.

[9] Hu C，Bai W. High-speed interrogation for large-scale fiber Bragg grating sensing[J]. Sensors，2018，18(2)：665.

[10] 何　俊，徐锡镇，贺　佳，等. 蓝宝石光纤光栅高温传感器研究进展与发展趋势(特邀)[J]. 红外与激光工程，2022，51(10)：11-33.
He Jun，Xu Xizhen，He Jia，et al. Research progress and development tendency of sapphire fiber Bragg grating-based high-temperature sensors (Invited)[J]. Infrared and Laser

Engineering, 2022, 51(10): 11-33.

[11] Habel J, Boilard T, Frenière J S, et al. Femtosecond FBG written through the coating for sensing applications [J]. Sensors, 2017, 17(11): 2519.

[12] Prakash O, Mahakud R, Dixit S K, et al. Effect of the spatial coherence of ultraviolet radiation (255 nm) on the fabrication efficiency of phase mask based fiber Bragg gratings[J]. Optics Communications, 2006, 263(1): 65-70.

[13] Arora D, Prakash J, Singh H, et al. Reflectivity and Braggs wavelength in FBG[J]. International Journal of Engineering, 2011, 5(5): 341-348.

[14] Melo M, Marques P V S. Fabrication of tailored Bragg gratings by the phase mask dithering/moving technique[J]. Photonic Sensors, 2013, 3(1): 81-96.

[15] 贾宏志. 光纤光栅传感器的理论和技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2000.
Jia Hongzhi. Research on Theory and Technology of Fiber Grating Sensor[D]. Xi'an: Xi'an Institude of Optics and Precision Mechanics of CAS, 2001.

[16] Li S, Hua D, Hu L, et al. All-fiber spectroscope with second-order fiber Bragg grating for rotational Raman lidar [J]. Spectroscopy Letters, 2014, 47(3): 244-252.

作者简介:

杨 铎(2000—),男,陕西省西安市人,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感与解调;

辛璟焘(1980—),男,副教授,主要从事光纤传感、光纤激光器及新型激光器等方面的研究。