

文章编号: 1005-5630(2023)05-0079-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.005.010

基于空间光耦合系统的芯片温度传感器

章 喆¹, 李明宇^{1,2}, 肖泽华¹, 潘 伦², 包 晟¹, 杨志平³, 李秋顺⁴

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 浙江光尖电子技术有限公司, 浙江 温州 325011;

3. 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

4. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院生物研究所, 山东 济南 250103)

摘要: 研究了一种硅光子芯片空间光耦合系统, 简化了集成光子芯片用光纤阵列耦合的方式, 通过将 1550 nm 附近波段的光通过空间光学系统, 经光栅耦合器垂直耦合进入集成光子芯片, 经过波导与微环谐振腔实现光学传感, 采用多模光纤收集出射能量, 并进行温度传感测试。实验结果表明, 用波长探测方式, 得到自由光谱范围(FSR)为 0.85 nm, Q 值为 16321 的环形谐振腔直通端透射谱线。在温度传感测试中, 其灵敏度达到 127 pm/°C。通过进一步对比测试表明, 空间光耦合与光纤阵列光耦合只在插入损耗方面有所差距, 耦合系统可得到较好的温度传感测试结果。空间光耦合具有更换传感器芯片便捷, 容易实现多通道测试等优点。

关键词: 集成光子芯片; 光耦合系统; 光栅耦合器; 光谱扫描; 温度传感

中图分类号: TH 477 **文献标志码:** A

The chip of temperature sensor based on spatial optical coupling system

ZHANG Zhe¹, LI Mingyu^{1,2}, XIAO Zehua¹, PAN Lun², BAO Sheng¹, YANG Zhiping³, LI Qiushun⁴

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Zhejiang LightTip Electronic Technology Co., LTD., Wenzhou 325011, China;

3. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China;

4. Biology Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103, China)

Abstract: A silicon photonic chip space coupling system is studied, which simplifies the coupling mode of integrated photonic chip with optical fiber array, Through the spatial optical system, the light in the band near 1550 nm is vertically coupled into the integrated photonic chip through the grating coupler, and the optical sensing is realized through the waveguide and microring resonator. The multi-mode optical fiber is used to collect the emerging energy and carry out the temperature

收稿日期: 2023-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(62027825); 国家重点研发计划项目(2020YFC2004600); 吉林省自然科学基金(20220101130JC); 山东省自然科学基金(ZR2019MC069); 高等学校学科创新引智计划(111计划D21009)

第一作者: 章 喆(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微纳光学与光子学器件。

E-mail: a1281063351@163.com

通信作者: 李明宇(1978—), 男, 教授, 研究方向为集成光学。E-mail: limingyu@cust.edu.cn

sensing test. The experimental results show that the transmission lines of the through-end ring resonator with free spectral range(FSR) of 0.85 nm and Q value of 16321 are obtained by wavelength detection. In temperature sensing tests, the sensitivity reached 127 pm/°C. The results show that there is only a difference between spatial optical coupling and optical fiber array optical coupling in insertion loss, and the coupling system can get better temperature sensing test results. Spatial optical coupling has the advantages of convenient replacement of sensor chip and easy to multi-channel testing.

Keywords: integrated photonic chip; optical coupling system; grating coupler; spectrum scanning; temperature sensor

引 言

集成光子芯片作为检测基于折射率改变的温度及生物分子变化的高灵敏度传感器,具有集成度高,灵敏性强,成本较低和体积小等优势^[1]。因此目前其可进行温度与生物传感的检测,在未来也有较广的发展空间^[2]。由于硅在 1550 nm 波长处具有 $1.84 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ^[3] 的正热光系数,因此由硅绝缘体制成的微环谐振腔传感器,可充分利用热光效应进行传感^[4-5]。当传感器的温度发生变化时,微环波导的有效折射率也会发生变化,这将导致微环谐振腔的谐振波长发生变化,通过这一原理可将微环谐振器作为温度传感器来使用^[6-8]。

目前,在光源与 Si 基集成光子芯片传感器之间的光束耦合方案上还存在着问题,一种耦合方案是使用端面耦合,将平面波导通过光截面直接与光纤透镜进行对准耦合,由于二者模场分布不同,导致其耦合效率受到限制^[9]。另一种方案是垂直耦合方案^[10-11],通过光栅耦合器将垂直方向光束与波导中水平方向光束耦合。2005 年, Taillaert 等^[12] 研究人员使用条状刻蚀光栅耦合器与普通单模光纤相互耦合。2010 年, Chen 等^[13] 基于绝缘体上硅(silicon on insulator, SOI)平台制成了新型的光栅耦合器,使用了振幅切趾的技术,在 Si 层使用变占空比的浅刻蚀技术,成功地实现了光栅的振幅切趾功能^[13],但其在制作精度方面要求较高。2010 年,夏纪朝等^[14] 设计了一种基于严格耦合波理论的亚波长光栅,这种亚波长结构使得元件的光栅强度得到了增强,亚

波长光栅结构还具有降低光栅表面反射率及折射率过度平稳等优点,但同样其在制备过程与工艺要求方面较为严格。

在垂直耦合方案中光纤阵列是常用的耦合元件,传统光纤阵列在传感测试中需要通过紫外固化胶与光学芯片进行黏合,在芯片传感结构紧凑时,紫外固化胶在芯片表面覆盖易影响传感区域的观测,在温度传感时会使得覆胶部分导热不均从而而影响传感效果。使用空间光学系统进行耦合则可以避免这一问题,并且在需要更换传感区域时,无需除胶并重新装调耦合设备,使得传感测试更加方便。2022 年,刘智颖等^[15] 提出一种用于级联双环生物传感器出入射共径多路空间对光系统。其光学系统包括入射透镜、分光镜、扫描振镜、聚焦透镜组等,能够实现检测光、级联双环生物传感器、光电探测器三者之间的简便、无损对光。但其目前仍处于理论研究阶段,未能进行实际测试。2023 年,肖泽华等^[16] 提出一种对应于光纤阵列的基于反射镜结构多路光学系统,可以快速准确的实现光路的切换,但此基于光纤阵列的转换系统还未适用于光学芯片,其耦合测试较难实现。为此本文设计空间光耦合输入/输出芯片的光耦合系统,并实现了一套温度传感器。

1 理论与仿真设计

1.1 光栅耦合器

集成光子芯片可以通过光栅耦合器将垂直方向的空间光耦合进/出波导,光栅耦合器原理可由布拉格衍射条件进行说明,它描述了入射光波

矢与衍射光波矢之间的关系。当光束由波导经光栅向空间衍射时, 入射光波矢为 K_{in} , 光栅矢量为 $K_{\Lambda} = \frac{2\pi}{\Lambda}$, n_u 与 n_c 分别为上下介质折射率, Λ 为光栅周期。此时光栅布拉格条件为: 入射波在光栅方向的波矢量与光栅矢量的整数倍叠加后, 所得的波矢的方向为衍射级的方向, 波矢的大小为光栅波导模式的传播常数大小^[17], 将其定义为 $\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot n_{eff}$ 。其中 n_{eff} 为波导的有效折射率, 由布拉格条件可得

$$K_{in} + m \cdot K_{\Lambda} = \beta, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

式中 m 为衍射级次。当光束由波导经光栅向空间中衍射, 此时 K_{in} 处于波导中且沿着光栅矢量 K_{Λ} 的方向, 如图 1 所示, 将布拉格常数与光栅矢量代入并整理后可表示为

$$n_{eff} + m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda} = n_u \cdot \sin \theta, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

为保证有衍射光输出, 则 $|\sin \theta| \leq 1$, 进而 $n_{eff} + m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda} < n_u$; 由 $n_{eff} > n_u$, 且 λ 与 Λ 都为正数, 可知 m 取负整数。

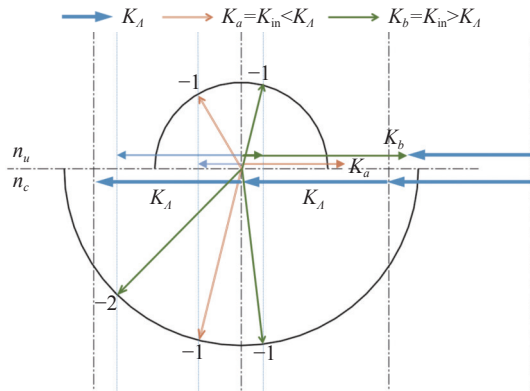


图 1 光栅衍射波矢图

Fig. 1 Diffraction vector of grating coupler

当 $K_{in} = K_{\Lambda}$ 时, 光栅的-1 级次衍射光会发生垂直衍射, 而-2 级次衍射光会反向进入波导, 称为二阶反射, 其会影响器件的工作性能。

当 $K_{in} = K_b > K_{\Lambda}$ 时, 如图 1 中绿色箭头 K_b 所示, 由于其大于光栅矢量, -1 级次衍射光产生正倾斜衍射, -2 级次衍射光沿光栅方向分量减小, 可以减小二阶反射。

当 $K_{in} = K_a < K_{\Lambda}$ 时, 如图 1 中橙色箭头 K_a 所示, 由于其小于光栅矢量, -1 级次衍射光产

生负倾斜衍射, 虽然其没有-2 级次光的衍射, 但是在相同入射波矢的情况下, 负倾斜耦合时的光栅矢量要大于正倾斜耦合时的光栅矢量, 导致光栅周期很小, 使得工艺难度加大, 制作误差增加^[18]。而另一方面在兼顾光纤接收时, 负倾斜耦合模式不利于对光进行测试。故本测试使用正倾斜耦合。

本文采用光栅耦合的方式进行集成光学芯片的光学耦合, 光栅耦合器的结构示意图如图 2 所示。兼容制作工艺难度与器件性能, 设计本系统中光栅耦合器的周期 Λ 为 $1 \mu\text{m}$ 、刻蚀宽度为 $0.5 \mu\text{m}$ 、占空比为 0.5、采用浅刻蚀技术, 刻蚀深度 *etch* 为 $0.085 \mu\text{m}$ 、硅层厚度为 $0.22 \mu\text{m}$, 芯片为 SOI 结构, 上包层为 SiO_2 。

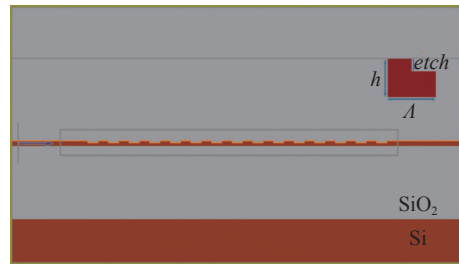


图 2 光栅耦合器结构图

Fig. 2 The structure of grating coupler

光经波导进入光栅耦合器向上耦合出芯片, 其电场分布如图 3(a) 所示。光栅耦合器的耦合效率定义为经耦合器件耦合输入/输出的能量占入射光源总能量的比值, 其受波导与光栅之间反射损耗能量、光栅衬底泄露能量及模斑失配等多种条件影响。图 3(b) 为光栅耦合效率随入射光源角度的变化曲线, 其在 7° 附近取得耦合效率的最大值, 并结合代工与工艺, 选择 7° 附近范围作为耦合输入/输出角度。仿真过程为: 使用高斯光源模拟空间光入射光栅耦合器, 在波导中添加监视器, 设置透过监视器能量与光源总能量占比随光源角度变化的扫描文件。通过扫描可得, 7° 耦合角度附近耦合效率约为 41%。入射光为 TM 偏振, 测试中使用偏振调节器来调节偏振态。

1.2 光路与机械结构

基于集成光子芯片的空间光耦合光路系统如图 4 所示。应用软件模拟波长为 1550 nm 的激光, 传输通过准直透镜后的入射情况, 入瞳

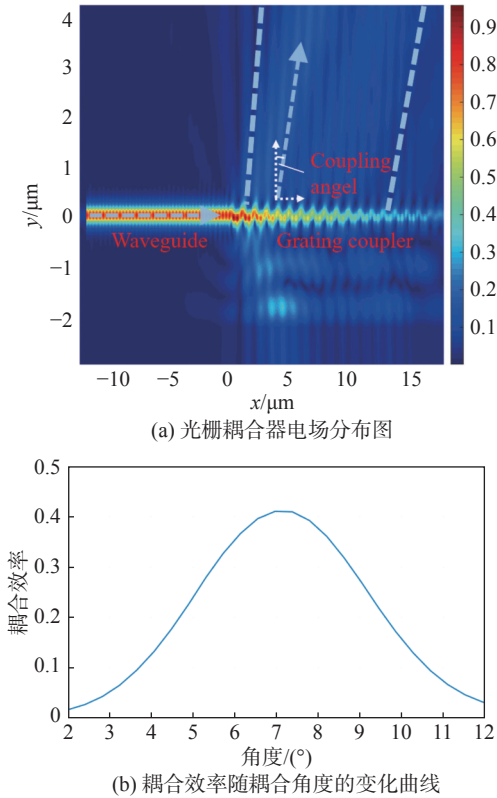


图 3 光栅耦合器电场分布图及耦合效率

Fig. 3 Electric field and coupling efficiency of grating coupler

1.6 mm，平行光入射区域 1 中半透半返镜，射入区域 2 中汇聚透镜。会聚透镜选取方式为：透镜直径尺寸应符合系统，直径过小则造成能量损失，直径过大则会阻挡接收端光纤靠近出射光栅端口，造成接收困难，故在设计中，直径的选取值为 6.3 mm；后焦距的选取值为 10~30 mm，焦距过短则接收端无法调节，且无法通过电子照相机观测光栅对准位置，焦距过大则光路过长，使得系统的体积过大，经考量与优化后，焦距的选取值为 20.97 mm。光束经汇聚透镜后，入射到芯片的光栅上，光栅长为 15 μm ，宽为 10 μm 。

考虑对准容差和损耗，像面光斑尺寸应略大于光栅尺寸，光栅的耦合角度通过像面的偏转来实现，现像面为原像面倾斜 7° 所得。图 5(a) 为光学系统的光线扇形图，其横坐标为归一化入瞳，纵坐标为光线在像面偏离主光线的值。可以看到，系统光线扇形图纵坐标最大尺度小于 10 μm 。图 5(b) 为点列图，其艾里斑半径为 26.09 μm ，达到衍射极限且兼顾了对准容差，成像质量良好。

使用软件模拟设计芯片载台和半透半反镜夹具。将芯片载台及散热装置固定于六维调节台上并缩短光程，用于拉开相邻六维台的空间位置并与垂面倾斜 7°；半透半反镜夹具可固定于水平伸出的具有 m6 孔的光学支杆上，拉开了空间位置并与垂面倾斜 45°。

2 集成光子芯片光耦合系统及温度传感

2.1 光耦合系统测试流程

基于集成光学芯片传感器的光耦合系统，其中心工作波长为 1 550 nm 附近 40 nm 范围内的检测光。光耦合系统实物如图 6(a) 所示：区域 1 为 Thorlabs PAF2-7C 准直镜；2 为分光镜；3 为汇聚透镜；4 为集成光子芯片与六维基台；5 为接收端多模光纤；6 为反射标定端准直镜；7 为收集光纤微调六维架；8 为温度控制模块。图 6(b) 为显微镜下光栅与波导图像，区域 1~4 为光栅区域，相邻光栅间距为 127 μm ，每个光栅尺寸长为 10 μm 、宽为 15 μm 。图 6(c) 为芯片环型谐振腔在显微镜下照片，在本传感测试中光束在微环下方直波导中从右至左经过。本文使用的芯片是由中科院微电子研究所代工所制，

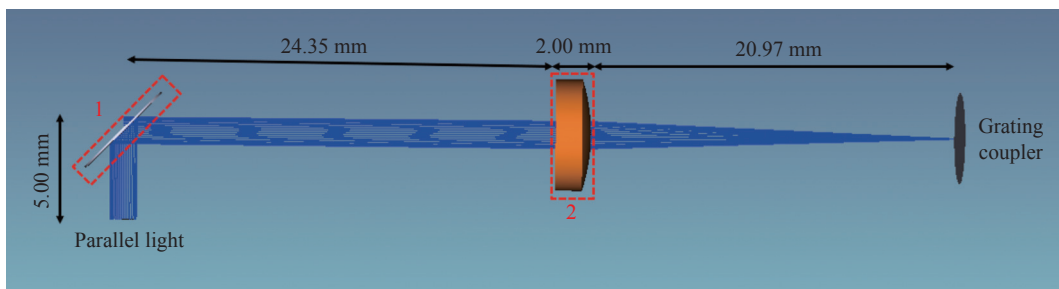


图 4 光路系统设计图

Fig. 4 Design diagram of optical path system

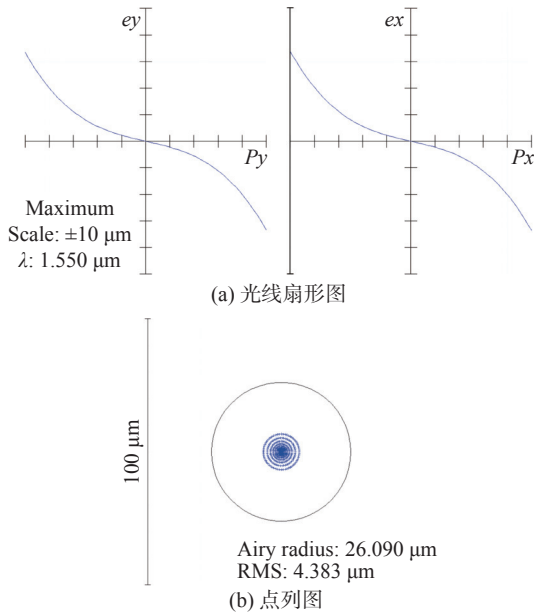


图 5 光学系统光线扇形图与点列图

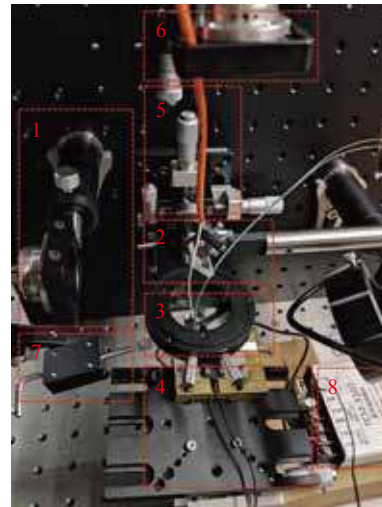
Fig. 5 Transverse ray fan plot and Spot diagram of optical system

其工艺制作流程, 主要包括以下步骤: 首先对晶圆进行清洗, 洗去表面杂质及有机污染物; 之后进行匀胶及光刻, 将掩膜置于光刻胶表面并曝光除胶; 接着进行干法刻蚀, 刻蚀掉未覆盖光刻胶区域的硅结构; 最后进行除胶, 生长二氧化硅上包层等操作。

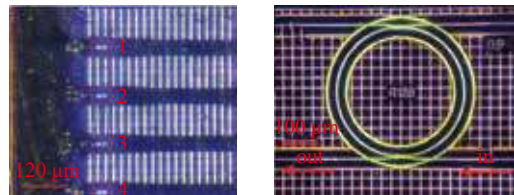
集成光子芯片的空间光耦合系统及测试方法为: 将宽带光源或激光器与红光激光通过一分二单模光纤耦合器连接到激光准直镜 1 的前端, 通过准直镜 1 输出平行光入射半透半反镜 2, 再通过汇聚透镜 3 将激光入射到集成光子芯片 4 的光栅耦合器上。再经由图 6(b)光栅耦合器与波导过图 6(c)中微环 pass 端从芯片出射, 由多模裸纤 5 接收并输入到激光光源功率计中, 并连接电脑进行数据处理, 得到其透射谱线信息。

其中反射标定端 6 由芯片端 4 反射经过透镜 3 并过分光镜 2, 由准直镜连接多模光纤接入功率计中, 此反射标定光路可判断入射光线是否对准, 避免同时调节入射光学系统与接收系统, 提高对准效率。并使用微型电子照相机来观察芯片上可见波段的光斑形状与光栅位置, 通过连接电脑输出图像来辅助对光。

图 7 为 1530~1570 nm 波段激光经空间光学系统并过波导与微环结构出射, 使用多模光纤接收并连接激光器功率计进行光谱扫描, 截取



(a) 空间光耦合测试系统装置图



(b) 显微镜下光栅图像 (c) 环形谐振腔在显微镜下图像

图 6 实验光机系统及微纳传感芯片部分结构

Fig. 6 Experimental optical and mechanical system and micro-nano sensing chip partial structure

1550 nm 波段附近的集成光子芯片 pass 端透射谱线。从图 7 中可看到近中心波长范围内, 相邻谐振峰的自由光谱范围 FSR 为 0.85 nm, 功率极值差即对比度为 6.31 dBm, 半高全宽 (FWHM) 为 0.095 nm, 品质因子 Q 值定义为谐振中心波长与半高全宽的比值, 如图 7 所示, 在 1550 nm 波长附近处的 Q 值约为 16321。

图 8 为 1530~1570 nm 波段空间光耦合与传统光纤阵列耦合光谱响应对比: 红线为空间光耦合系统经过波导与微环结构 pass 端梳状透射谱线, 蓝线为同芯片同位置光纤阵列透射谱线图像。

通过谱线对比图可以发现, 空间耦合测试得到的透射光谱, 其在谱线特征方面为集成光子芯片微环直通端的梳状透射谱线。空间光耦合与传统光纤阵列相比, 在能量耦合效率方面有所差距, 约为 14.3 dB, 而在其余透射谱线特征方面均差异较小。由于光学元件的损耗与光机结构定位偏差影响, 其与光纤阵列直接耦合相比多了各部分元件带来的误差累积。此外, 由于芯片光栅

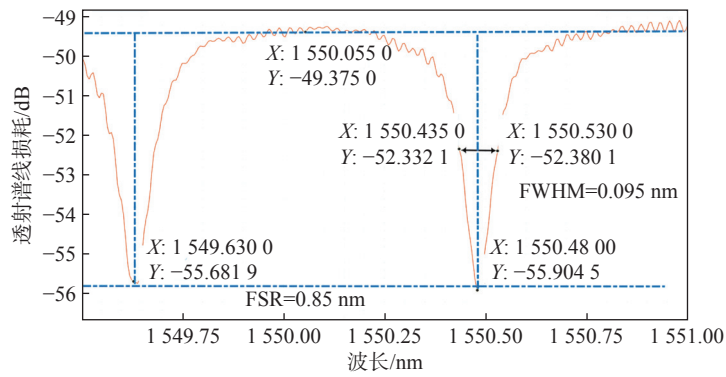


图 7 空间对光系统经芯片单环透射光谱扫描图

Fig. 7 Spectral scan of the space optical system through the chip pass terminal

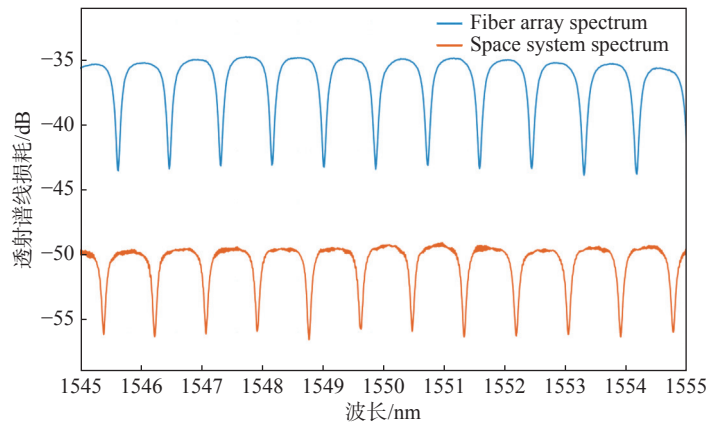


图 8 同结构空间对光系统与光纤阵列单环透射光谱对比图

Fig. 8 Comparison of single-loop transmission spectrum between optical system and optical array in the same structure

体积小影响操作精度，焦平面处实际光斑半径要比设计的光斑尺寸大，也会降低耦合效率。波长方向谐振波谷的偏差由温度差异引起，其不影响整体谱线特征。

2.2 温度传感测试

由于硅光子芯片具有正热光系数，可充分利用热光效应进行传感。温度传感本质原因为：温度变化引起微环谐振腔有效折射率 n_{eff} 变化，由谐振方程 $n_{\text{eff}} * 2\pi R = m\lambda$ 可知，对于相同微环结构，由外界条件变化引起的有效折射率的改变使得谐振波长发生变化，其可表示为透射谱线在波长方向的漂移，通过分析波长漂移量与温度变化的对应关系可得出温度传感器的灵敏度。

本测试通过数字温度传感模块，对 TEC 材料及芯片进行温度控制，每变化 0.3 °C 测试一组数据，图 9 为在数字温控模块显示的温度，其

从 21.55 °C 变化至 25.45 °C 时，1550 nm 附近波段光学系统透射光谱图。温度传感拟合结果显示如图 10 所示，将数据拟合后可看出光谱波长随温度变化漂移量呈现线性变化，实验测得该传感器灵敏度为 127 pm/°C。实验证明通过光谱谱线漂移可精确反应温度的变化，其 R^2 为 0.998，残差平方和为 0.002。

空间光耦合进行温度传感属于遥感系统，其相对于传统阵列耦合方式，优势在于：光线输入/输出系统不与传感芯片接触，非接触式传感器使用寿命较长，无磨损且没有外界温度、湿度变化引起的紫外胶的不稳定及覆胶部分的温度差异等影响，可有效检测短距离范围内微小的温度变化。

3 总 结

基于集成光子芯片传感器的光耦合系统及测

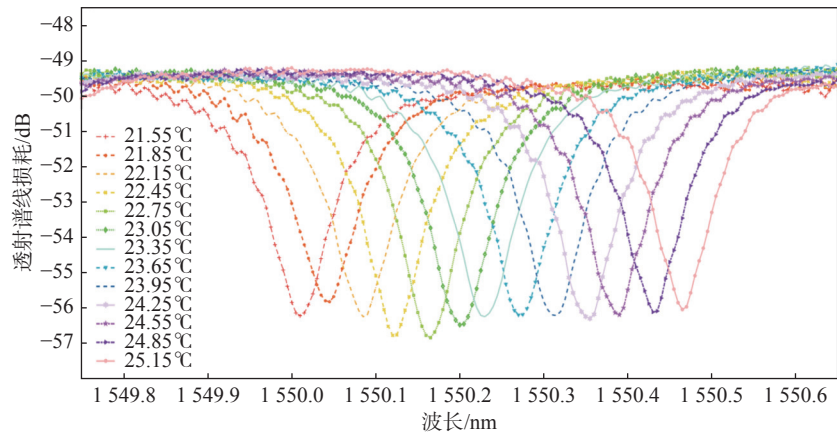


图 9 温度传感测试透射谱采样图

Fig. 9 Transmission spectrum sampling diagram of temperature sensing test

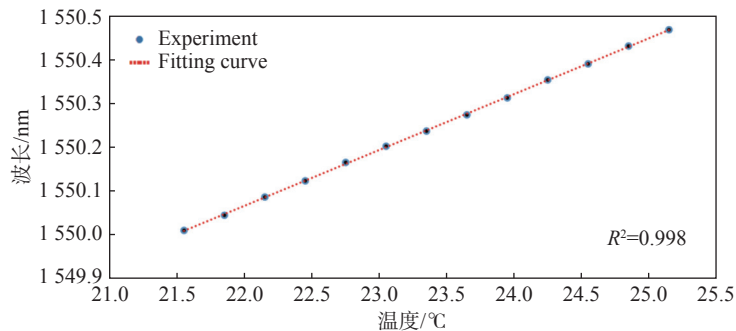


图 10 透射谱中心波长随温度变化的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of the central wavelength of transmission spectrum as a function of temperature

试方法, 采用空间光耦合方式, 将 1550 nm 附近波段光源通过空间光学系统经光栅耦合器垂直耦合进入集成光子芯片, 经过波导与微环谐振腔实现光学传感, 采用多模光纤裸纤空间收集出射能量, 并通过激光器光谱扫描判断耦合能量损耗与对准位置偏差。由激光器输入 0 dBm 并连接闭环输出可进行光谱扫描, 其结果显示接收空间光的光谱特征为集成光子芯片 pass 端光谱, 中心波长附近峰值功率值-49.3 dBm, 减去光纤阵列封装方式接收得到的峰值功率值-35 dBm, 可得空间光耦合系统耦合效率 14.3 dB, 相邻谐振峰的自由光谱范围为 0.85 nm, 对比度为 6.31 dBm, 半高全宽为 0.095 nm, 品质因子 Q 值为 16321。从温度传感测试可以看出, 该传感器灵敏度达到 127 pm/°C、 R^2 为 0.998, 本装置温度传感特性稳定。其可代替传统光纤阵列耦合, 提高了芯片使用效率, 降低了系统成本, 提高了可操作

性。通过光谱数据对比可以看出, 空间光耦合只在能量强度方面有所差距, 空间光耦合易更换芯片、方便调节对光耦合区域等。本系统作用于温度传感时, 可避免由紫外胶引起的粘贴不稳定及覆胶部分的温度差异等影响。本系统未来可选择加入扫描振镜, 对传感器阵列进行快速精确扫描。

参考文献:

- [1] DELAGE A, CHEBEN P, DENSMORE A, et al. Application of optical telecom planar technology to silicon-based microphotonic and sensors[C]//2006 International Conference on Transparent Optical Networks. Nottingham: IEEE, 2006: 128 - 131.
- [2] Momeni B, Yegnanarayanan S, Soltani M, et al. Silicon nanophotonic devices for integrated lab-on-a-chip sensing[C]//2010 Annual International Conference of

- the IEEE Engineering in Medicine and Biology. Buenos Aires: IEEE, 2010: 4419 – 4422.
- [3] 林柏竹. 硅基聚合物波导热光开关及其集成技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [4] 谢佳一, 苏国帅, 李明宇, 等. 反射型法布里-珀罗腔和微环谐振腔级联的温度传感器 [J]. 光学学报, 2022, 42(23): 226 – 231.
- [5] 王艺蒙, 舒浩文, 韩秀友. 高精度硅基集成光学温度传感器研究 [J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1355 – 1361.
- [6] BISWAS U, RAKSHIT J K, DAS J, et al. Design of an ultra-compact and highly-sensitive temperature sensor using photonic crystal based single micro-ring resonator and cascaded micro-ring resonator[J]. Silicon, 2021, 13(3): 882 – 892.
- [7] VERMA Y K, TRIPATHI S M. Simultaneous temperature and humidity insensitive race track ring resonator using silicon and titanium dioxide waveguides in cavity[J]. Results in Optics, 2021, 5: 100176.
- [8] 穆洲. 基于微环谐振器的传输特性及温度传感特性研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [9] 洪泽华. 微纳光波导倏逝场耦合结构及其特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [10] 杨彪, 李智勇, 肖希, 等. 硅基光栅耦合器的研究进展 [J]. 物理学报, 2013, 62(18): 184214.
- [11] TONG X G, LIU J, XUE C Y. High- Q micro-ring resonators and grating couplers for silicon-on-insulator integrated photonic circuits[J]. Journal of Semiconductors, 2013, 34(8): 085006.
- [12] TAILLAERT D. Grating couplers as interface between optical fibers and nanophotonic waveguides[J]. 2005.
- [13] CHEN X, LI C, FUNG C K Y, et al. Apodized waveguide grating couplers for efficient coupling to optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(15): 1156 – 1158.
- [14] 夏纪朝, 黄元申, 朱冬月. 基于严格耦合波理论的亚波长光栅优化设计 [J]. 光学仪器, 2010, 32(6): 40 – 44.
- [15] 刘智颖, 包晟, 李明宇. 用于级联双环生物传感器出入射共孔径多路空间对光系统: 中国, 113899699A [P]. 2022 – 01-07.
- [16] 肖泽华, 李明宇, 苏国帅, 等. 基于扫描反射镜结构的多路光开关 [J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(1): 136 – 143.
- [17] 冯俊波. 硅基微纳光栅耦合器件及其制备技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [18] 邹静慧. 用于硅基光集成芯片与光纤耦合的光栅耦合器 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.

(编辑: 张 磊)