

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412493

基于光栅耦合技术的光子芯片传感测试系统*

刘星宇^{1,2}, 郭荣翔^{1,2}, 郎玘玥^{1,2}, 刘铁根^{1,2}, 程振洲^{1,2}

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072; 2. 光电信息技术教育部重点实验室 天津 300072)

摘要:随着光子芯片技术的快速发展,先进的光电芯片测试系统受到越来越多的研究关注。然而,现有光子芯片测试系统主要针对通信芯片的需求开发,缺少对环境参量的控制功能,难以满足传感芯片的研发需求。本文报道了一种基于光栅耦合技术的光子芯片传感测试系统,可以实现光栅自动耦合、环境控制与感知、数据处理与交互等功能,并利用此系统完成了基于微环谐振腔光学芯片的气体浓度传感与温度传感实验。结果表明,在常温常压条件下,此系统可以对浓度为20%~80%之间的CO₂气体进行检测,灵敏度可以达到0.152 GHz/% (2.113 pm/%),同时可以对30℃~35℃之间的环境温度进行检测,灵敏度为4.996 GHz/℃ (74.891 pm/℃)。本工作为光学传感芯片的研发提供了快速高效的技术手段。

关键词:硅基光子学;光栅耦合技术;光学传感芯片;环境检测

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Photonic chip sensing test system based on grating coupling techniques

Liu Xingyu^{1,2}, Guo Rongxiang^{1,2}, Lang Qiyue^{1,2}, Liu Tiegeng^{1,2}, Cheng Zhenzhou^{1,2}

(1. School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: Advanced photonic chip testing systems have attracted significant attention to date. However, existing photonic chip testing systems are primarily developed for communication chips and lack environmental parameter control functions, making them insufficient for the development needs of sensing chips. In this study, we present a photonic chip sensing test system based on grating coupling techniques. The system consists of automatic grating coupling, environment control and perception, as well as data processing and interaction. Using this system, we demonstrated gas concentration sensing and temperature sensing by using a silicon micro-ring resonator. Experimental results show that under standard temperature and pressure conditions, the system can detect CO₂ gas concentrations ranging from 20% to 80%, with a sensitivity of 0.152 GHz/% (2.113 pm/%). Moreover, the temperature sensing can be achieved in a range of 30℃ to 35℃ with a sensitivity of 4.996 GHz/℃ (74.891 pm/℃). This work provides a rapid and efficient approach for the development of optical sensor chips.

Keywords: silicon photonics; grating coupler techniques; optical sensing chip; environmental monitoring

0 引言

随着物联网、工业化4.0和大数据技术的快速发展,具有环境感知功能的智能设备应用范围极大增加,对智能制造、健康诊断、消费电子、精准农业、新能源汽车等领域的发展起到巨大的推动作用^[1-3]。传感器是智能设备的关键技术之一,其中,光学传感器以光波为载体,通过

测量环境所引起光场的强度、相位、偏振等性质的变化来检测环境中物理量特征,具有抗电磁干扰能力强、响应速度快、非接触式检测、在多变复杂环境中性能稳定等突出优势。目前,光学传感器已被广泛用于检测环境中气体化学成分^[4-5]、压强^[6-7]、温度^[8-9]和湿度^[10]等信息。在现有的各类光学传感技术中,光学传感芯片具有集成度高、体积小、成本低、可以与微电子和光电子器件单片集成等优势,未来有望实现芯片级的信息检测、采集、处理、计算

收稿日期:2024-02-08 Received Date: 2024-02-08

* 基金项目:国家自然科学基金(62175179, 62161160335, 61805175)、天津市杰出青年基金(23JCJCJC00250)项目资助

和通信等功能。因此,光学传感芯片技术近年来获得了广泛的关注^[11-13],被认为是推动下一代物联网应用的关键技术之一^[14]。

硅基波导集成的光学传感器件具有制作工艺与互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术相兼容、物理化学稳定性好、可实现多种功能器件高密度集成等优势,是一种极具应用前景的芯片传感技术^[15-17]。其中,光学耦合封装是硅基波导器件的关键技术之一。一般来讲,可以采用端面与光栅两种方法实现波导器件的光场耦合封装^[18],其中,光栅耦合具有耦合位置灵活、对准容差大、对准速度快、无需磨片处理等优势,非常适用于研发波导集成的光学传感芯片^[19-20]。然而,现有光子芯片检测系统主要针对通信芯片的需求开发,缺乏对芯片所在环境中物理参数(例如气体、温度等)的准确控制,难以满足传感芯片的研发需求。

针对上述问题,本文介绍了一种基于光栅耦合技术的光子芯片传感测试系统,可以实现光栅自动耦合、环境控制与感知、数据处理与交互等功能。系统主要包含:信号输入模块、光电耦合模块、信号探测模块、环境控制模块、数据处理和交互模块等五部分。采用空间映射、图像处理和耦合功率判据相结合的三级自动耦合方法,完成光纤-光栅的高效对准和波导器件的光场能量耦合,可用于实现片上光学传感器件的快速测试。利用开发的系统,基于硅基波导耦合的微环谐振腔器件,分别实现了气体浓度传感和环境温度传感。实验结果表明,此系统可以对浓度为20%~80%之间的CO₂气体进行检测,灵敏度可以达到0.152 GHz/%(2.113 pm/%),同时可以对30℃~35℃之间的环境温度进行检测,灵敏度为4.996 GHz/℃(74.891 pm/℃)。本文所报道的光子芯片传感测试系统将为研发光学传感芯片提供有力的技术支持。

1 系统介绍

1.1 系统模块组成

本论文所提出的光子芯片传感测试系统由5个模块组成:信号输入模块、光电耦合模块、信号探测模块、环境控制模块、数据处理和交互模块,如图1所示。信号输入模块包含激光器、信号发生器、输入光路和电路,具有根据用户输入的指令产生不同强度、频率的光信号和电信号的功能。光电耦合模块由光学探针、电学探针、光电探针位移台、芯片位移台及相应的控制程序组成,拥有人工耦合和自动耦合功能,人工耦合通过用户输入的移动指令控制光电探针移动,而自动耦合则通过三级判据,即芯片映射判据、图像处理判据和耦合功率判据,实现

光电探针从粗略对准到精细对准。耦合对准过程将会在本文第2节光栅自动耦合方法中做详细介绍。信号探测模块包括光电探测器、示波器、相机等设备,用于采集数据并反馈到人机交互模块进行显示。环境控制模块包括测量腔室以及环境调控装置,可实现现有光子芯片测量系统(表1)不具备的环境调控功能。环境控制模块的详细内容将在本文第3节气体和温度传感测试中进行阐述。数据处理和交互模块包括计算机、显示屏、数据连接线路和交互程序,通过总线进行数据交换和处理,并对其他模块进行控制。通过各模块的协同工作,系统具有灵活的环境控制、多元的信号测量和创新的耦合方法等独特优势。

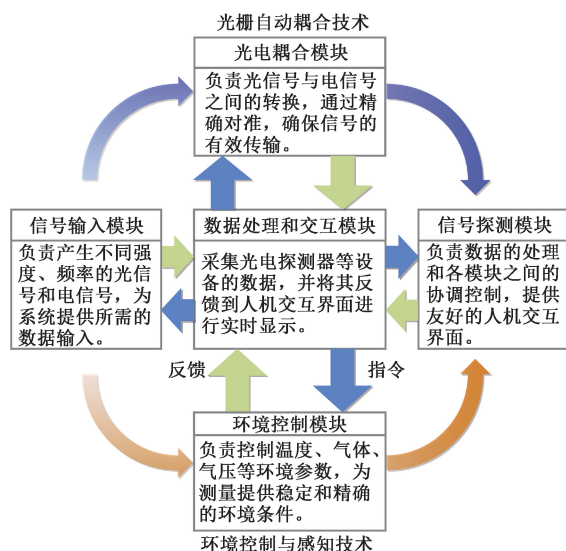


图1 基于光栅耦合技术的光子芯片传感测试系统模块示意图

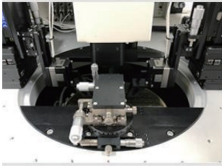
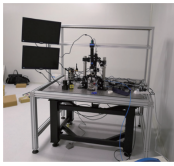
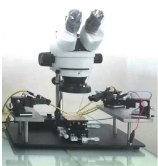
Fig. 1 Schematic diagram of the photonic chip sensing test system based on grating coupling techniques

1.2 系统工作原理

光子芯片传感测试系统利用光子芯片与测量腔室中复杂环境的信号耦合作用,通过人机交互界面对系统各模块进行指令和监测,结合数据采集模块对光子芯片的反馈数据进行收集,从而获取所需的环境参数。系统的操作流程如下:首先,将光子芯片固定于位移台上,关闭腔室,确保腔内环境稳定;然后,利用自动耦合系统实现光信号与光子芯片的高效耦合;接着,根据检测需求,设置温度、气体、照明光强等环境参数;随后,收集芯片输出的检测信号,并基于采集的数据进行环境参量分析;最后,待检测结束后,将光子芯片测量腔室内残余气体排出至废气收集箱。该系统通过自动化耦合提高了芯片耦合对准的操作效率和精度,可以综合评估光子芯片在不同环境条件下的性能,为光子芯片传感器的研发提供了有力支持。

表 1 已报道的光电芯片检测系统

Table 1 Reported optoelectronic chip testing systems

名称	光电探测器参数自动测试系统	全自动硅晶圆测试系统	自动硅光芯片耦合测试系统	光电芯片参数分析系统
所属公司	易捷测试技术有限公司	联讯仪器股份有限公司	上海勤确科技有限公司	西安和创电子科技有限公司
系统图片				
技术优势	实现光电探测器参数的自动光控测试与判别比较,具备管理、存储、处理等功能,支持2~8英寸晶圆的整片测试和碎片测试。	具备全自动与半自动作业模式,采用全闭环高精度运动控制系统,配备高清变倍 CCD 配置,同时呈现低倍与高倍多视野画面,提升测试效率。	为测试提供稳定的环境,满足高电流测试要求,不受外界强磁场、大电流及极低温的影响,确保测量结果的高精度和可靠性。	具备高精度、宽测量范围和灵活专业的测试软件,满足器件、材料、半导体及有源/无源元件的电气表征需求。

2 光栅自动耦合方法

2.1 芯片映射判据法

本文提出了一种用于波导器件测试的芯片空间映射定位方法,其工作原理如图 2 所示。首先,将芯片固定在芯片位移台上并通过显微成像系统观测芯片上的波导器件,使用计算机识别芯片上的多个预设计的标志物,测量设计版图中这些标志物的设计距离与实际距离,从而确定他们之间的对应位置。然后,根据设计版图,计算目标

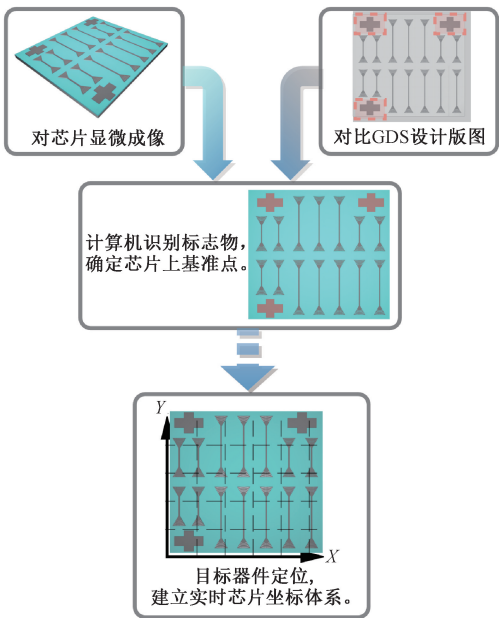


图 2 芯片映射判据定位方法原理图

Fig. 2 Principle diagram of the chip mapping criterion positioning method

器件在位移台中相对基准点的坐标位置。最后,通过控制步进电机移动芯片位移台,实现目标器件在设计版图和芯片位移台之间的空间映射定位,建立实时芯片坐标系。这项“芯片映射”技术可以使器件定位更加便捷。通过在芯片设计版图上选择相应器件,可直接定位于芯片实物上,简化了定位过程并提高了定位速度^[21]。

2.2 图像处理判据法

基于上述介绍的“芯片映射”技术,光子芯片传感测试系统实现了初步的信号耦合并建立了实时坐标系。为了更高效准确地进行光电耦合,系统还引入了图像处理判据法,配合程序控制位移台来确定芯片中光栅耦合器的位置,原理如图 3 所示。

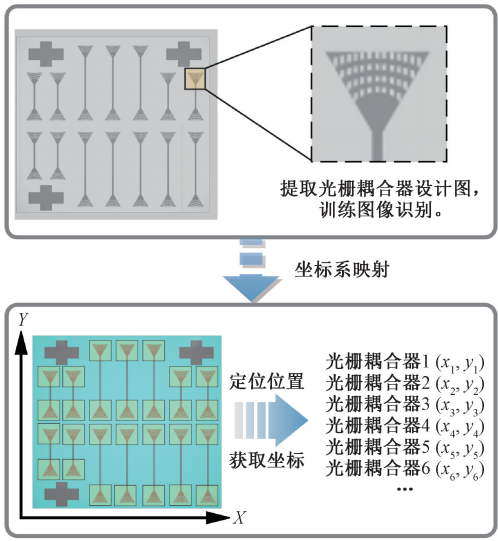


图 3 图像处理判据定位方法原理图

Fig. 3 Principle diagram of the image processing criterion positioning method

首先,从芯片设计图的 GDS 文件中提取光栅耦合器的相关设计图纸;然后,利用图像识别方法确认光栅耦合器轮廓;随后,将设计图中光栅耦合器的坐标转换为在测量平台上定位的实际坐标;最后,通过程序控制位移台实现光纤或芯片的移动,找到最佳耦合区域,完成光纤与芯片的基本对准。这种基于“图像处理”技术的自动耦合方法具有灵活、准确和智能的特性,成本较低。无需新增硬件,通过升级已有的测试系统软件,即可实现对不同波导器件结构的自动测量,从而降低了人工测试成本^[22]。

2.3 耦合功率判据法

通过“芯片映射”技术和“图像处理”技术,可以实现光纤在光栅耦合器附近的准确、迅速自动调整,为实现精确对准需要通过比较不同位置处耦合功率的方法来寻找芯片平面上的最优耦合位置,即“耦合功率”判据。

首先,确定合适的单步步长。然后,控制光纤沿设定的扫描路径移动,在每移动一个单步的步长后,进行耦合位置优化,提出的扫描路径和方法如图4所示。如图4(c)所示,在最优耦合位置附近,光纤 x 与 y 位置坐标变化时耦合效率呈递减趋势。由于采用的光栅耦合器在 x 方向上存在对称性,固定 y 坐标进行 x 方向扫描,以找到最高耦合功率所对应的 x 坐标,接着进行 y 方向扫描以定位可能的最佳耦合位置。最后,在该位置附近进行精细扫描,比较所有扫描点的功率值,其中功率值最大值所对应的空间坐标即为最佳耦合位置。这种结合功率变化趋势来确定扫描方向的方法,相较于如图4(a)与(b)所示的单步扫描方法,不再限于初始位置相对于最佳耦合位置的方向。此外,这种分别进行 x 、 y 方向分别扫描的方法在扩大了扫描区域同时也减少了扫描所需的步数和时间,具备良好的扩展性。

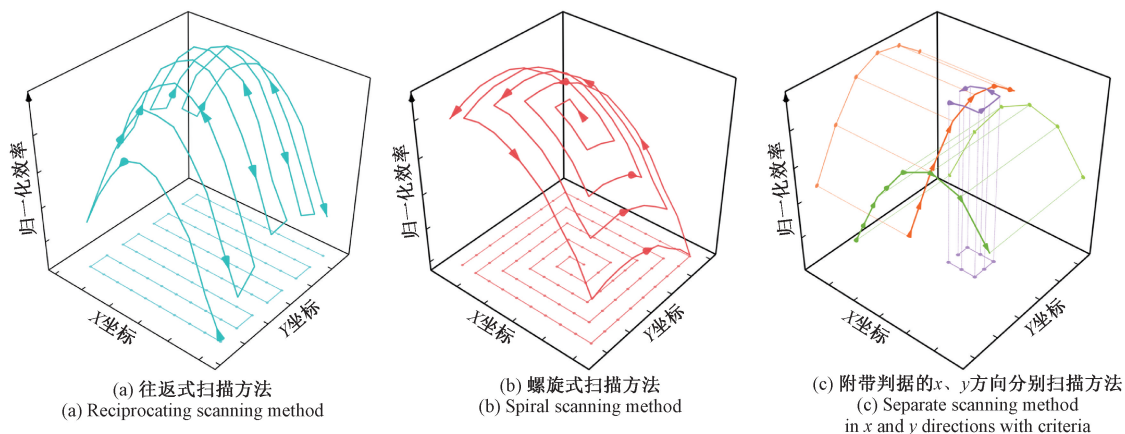


图4 所提出的自动耦合功率判据扫描方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the proposed automatic coupling power criterion scanning methods

2.4 耦合测试结果

通过耦合测试实验可以验证光子芯片传感测试系统中自动耦合测试功能的有效性。系统中采用的光电耦合模块包括分别固定有输入和输出光纤的三轴位移台(Thorlabs Nanomax300)以及控制位移台的步进电机驱动器(Thorlabs DRV208),位移台由计算机程序提供指令,以调整光纤与芯片之间的耦合距离和角度,从而实现光纤与芯片的高效耦合。为了保持环境配置统一,自动耦合扫描时采用 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的单步扫描精度,在 $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ 的扫描区域内对标准光栅耦合器件进行测试,为了缩减扫描用时,初始扫描步长设定为两倍的单步扫描精度,即 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。在每个位置进行3次采样,取平均值以减小误差,扫描过程如图5所示,最佳耦合位置在图中用五角星标出。第1步(实线),通过对 y 方向的扫描,比较功率值并

记录功率最高的点,从而寻找最佳耦合位置的 y 坐标。第2步(短点划线),以步骤一获得的功率最高点为初始位置,使用与步骤一相同的方法在保持 y 坐标不变的基础上进行 x 轴方向的扫描,并记录下功率最高点所对应的坐标,即为可能的最佳耦合位置。第3步(双点划线),是为了验证最佳耦合位置并避免误差。考虑到电机存在的诸如回程差等误差因素,对步骤1、2初步寻找到的最佳耦合位置周围的坐标点进行扫描,进一步确定最佳耦合位置,提高耦合位置的准确性。第4步(短划线),进行最终的精细扫描操作。将扫描区域限制在上一步所获取的最佳耦合位置周围 $2\text{ }\mu\text{m} \times 2\text{ }\mu\text{m}$ 的区域,并以 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的步长进行耦合位置的扫描。扫描完成后,对所有扫描过的点的功率值进行非线性曲面拟合,通过拟合后峰值的位置判定最高耦合功率的位置。

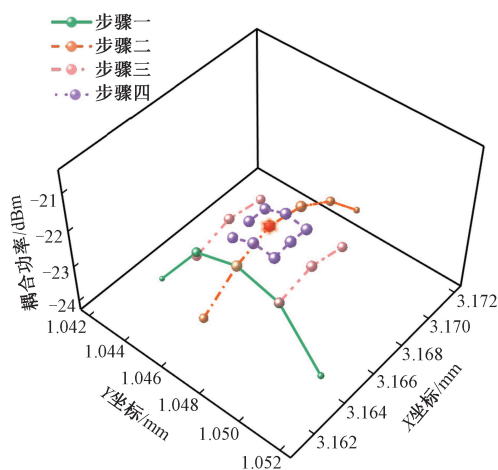


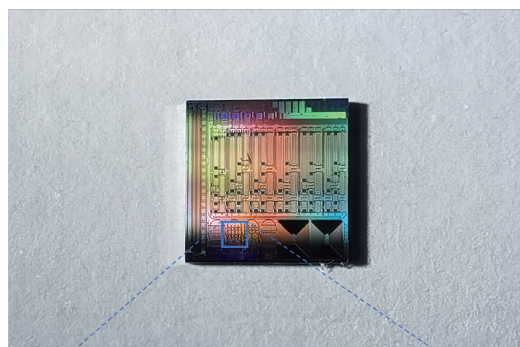
图 5 采用附带判据的 x 、 y 方向分别扫描结果

Fig. 5 Results of the separate scanning method in the x and y directions by using the criterion

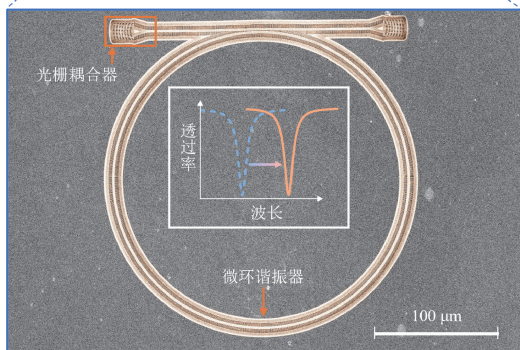
3 气体和温度传感测试

3.1 光子芯片传感测试系统理论基础

为了验证所研发的光子芯片传感测试系统的性能,在中科院微电子所流片制作了硅基波导集成的微环谐振器如图 6 所示,用于开展气体和温度的片上传感实验。



(a) 芯片实物图
(a) Physical image of the chip



(b) 硅基微环谐振腔结构SEM图
(b) SEM image of silicon microring resonator

图 6 硅基波导耦合的微环谐振器

Fig. 6 Microring resonators coupled with the silicon-based waveguide

图 6(a) 是光子芯片的实物图。微环谐振器由波导两端的超薄亚波长光栅耦合器进行光场耦合,如图 6(b) 的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图像所示。微环谐振器的透射光谱呈现洛伦兹共振线形。当谐振器所处的环境发生变化时,微环透射谱中的洛伦兹共振峰位置会发生偏移,通过测量共振峰位置的偏移量就可以感知环境的变化,如图 6(b) 中插图所示。以 CO_2 气体传感和温度传感为例。当气腔中的 CO_2 气体浓度变化时,整个气腔的环境折射率会发生变化,此过程可以用式 (1) 与 (2) 描述:

$$n = 1 + \rho \langle R_G \rangle \quad (1)$$

$$\langle R_G \rangle = \sum_{i=1}^s R_{Gi} X_i \quad (2)$$

其中, n 表示整个气腔的环境折射率, ρ 表示摩尔密度,其单位是 mol/cm^3 , $\langle R_G \rangle$ 为格拉德斯通 - 戴尔常数, S 表示气体氛围中存在的组分数目, X_i 表示对于气体组分的摩尔分数。同时,气腔的环境折射率也随环境温度的变化而变化,这一变化过程可以用 Sellmeier 方程,即式 (3) 描述:

$$n^2(\lambda, T) - 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i(T) \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2(T)} \quad (3)$$

其中, S_i 是在波长 λ_i 下材料中共振特征的强度, λ 为工作波长。

实验通过测量微环透射谱中的洛伦兹谐振峰位置偏移量来感知环境的变化,谐振波长 λ_{res} 的定义由公式 (4) 描述:

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{m}, \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

其中, m 表示谐振级数, n_{eff} 表示微环波导中模的有效折射率。当环境折射率 n 变化时微环波导中模的有效折射率 n_{eff} 会随之变化,进而导致谐振波长的偏移,本文将偏移量记为 $\Delta\lambda$, 从而实现环境参数的测量。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{res}}} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_g} \quad (5)$$

其中, Δn_{eff} 是波导有效折射率的变化量, n_g 为波导的群折射率。

为增大波导中光能量与待测气体的相互作用,实现更灵敏的气体传感响应,本文采用了超薄硅基波导结构^[23]。通过合理设计波导结构,可以抑制超薄硅基波导的泄露损耗。此外,由于超薄波导中的光模式与波导侧壁的重叠较小,因此有效降低了光学传输损耗,从而实现更高的微环谐振腔品质因子 Q 值,提高传感器的灵敏度。

3.2 光子芯片传感测试系统硬件介绍

光子芯片传感测试系统实验平台如图 7 所示。信号输入模块包含一个连续波可调谐激光器 (IPG CLT-2250-500)。其发出的光经过光隔离器和准直器

后耦合进单模光纤 (Thorlabs SM2000)。光电耦合模块配置与 2.4 节中配置相同。信号探测模块采用铟镓砷光电二极管功率计 (Thorlabs PM100D) 测量输出光纤采集到的芯片输出光功率。通过在芯片双轴位移台上安装一个温度分辨率为 0.1℃ 的热电致冷器实现环境温度的控制,调控范围为 0℃ ~ 60℃。为了实

现对气体浓度的精确控制,采用密闭气室作为环境控制模块的测量腔室。在气室外部配备了气瓶、气体流量控制计 (Fujikin FCST1005) 和排气箱。通过精确控制气体流速和充气时间,以及实时监测气体浓度和调节环境温度,光学传感的准确性和稳定性得以大幅度提升。

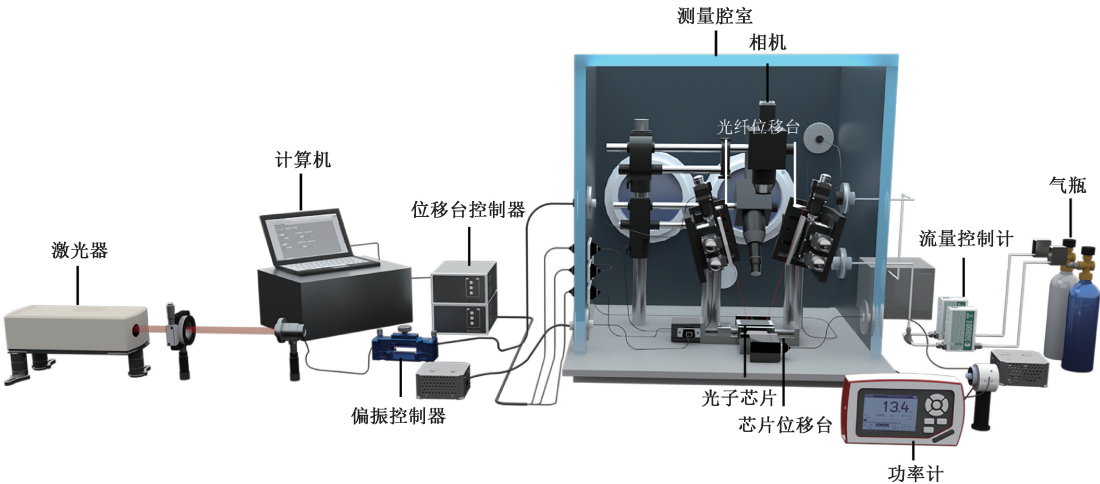


图 7 光子芯片传感测试系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the photonic chip sensing test system

3.3 基于硅基微环谐振器的传感实验

1) 气体浓度传感实验

利用光子芯片传感测试系统对硅基波导集成微环谐振器进行气体浓度传感的性能表征。首先,将微环谐振器光芯片放置在耦合平台上,利用光电耦合模块自动耦合。然后,用环境控制模块的气体流量控制计向测量腔室中注入 CO₂ 气体,在达到设定浓度后,等待 15 min 至气体浓度均匀稳定,用信号探测模块获取透射光谱信息,并将数据发送到计算机。接着,数据处理和交互模块对信号探测模块采集到的数据进行处理、显示与储存。在整个实验中,为了消除温度波动的影响,系统控制热电致冷器在常压下维持腔内环境温度恒定。测得初始的洛伦兹共振峰位置在 2 115 nm。最后,记录下环境温度在 29℃ ~ 32℃ 区间内,不同 CO₂ 气体浓度对应透射光谱洛伦兹共振峰的偏移量,如图 8 所示,其中点划线表示测量数据的拟合结果,实线表示理论仿真结果。测量结果显示,环境温度在 29℃ ~ 32℃ 的温度范围内,CO₂ 气体浓度在 20% ~ 80% 的浓度范围内,共振峰的偏移量会随着气体浓度的增大而呈上升趋势,并且该偏移效应不存在温度依赖 (特异) 性,也没有明显的平台效应,超出该范围的数据点用空心点表示。对所有实心数据点的共振峰偏移量随 CO₂ 气体浓度的变化进行线性拟合,并定义共振峰偏移量随气体浓度变化的斜率值为传感器的灵敏度,

用于表征器件对待测气体浓度变化的响应程度。拟合结果表明,微环谐振器对气体传感灵敏度的均值约为 0.152 GHz/% (2.113 pm/%)。根据测量的 4 组数据,可计算出实验中折射率灵敏度范围在 1 417 nm/RIU 至 1 707 nm/RIU 范围内,平均值约为 1 500 nm/RIU,验证了可采用所研发的系统对微环谐振腔器件进行测试。

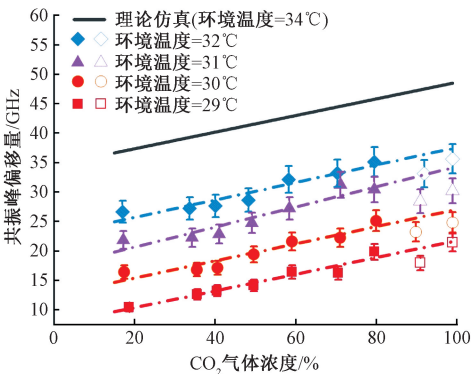


图 8 透射谱共振峰偏移量随气体浓度变化曲线

Fig. 8 Resonant wavelength variation of the transmission spectrum as a function of the gas concentration

2) 温度传感实验

本文还验证了光子芯片传感测试系统的温度传感性能。考虑到传感器的温度灵敏度较高,实验在较小的温

度区间进行测试。在光电耦合模块自动耦合完成后,通过控制密闭气室中的 CO_2 气体浓度稳定,以 1°C 为步长调控热电致冷器,使温度从 30°C 逐步升高到 35°C ,在达到预设值后,等待 15 min 至温度稳定。通过信号探测模块获取透射光谱,并发送至数据处理和交互模块。不同 CO_2 浓度下,微环谐振器谐振波长的偏移量随环境温度变化曲线如图 9 所示,其中虚线表示测量数据的拟合结果,实线表示理论仿真结果。随着温度的升高,在 $30^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 环境温度变化范围内,透射光谱共振峰偏移量呈现出单调上升趋势,超出该范围的数据点用空心点表示。这种偏移也不存在浓度依赖(特异)性以及平台效应。对所有实心数据点的共振峰偏移量随环境温度的变化进行了线性拟合,用于表征器件对温度的响应程度。由图 9 中的线性拟合结果得出,温度灵敏度均值约为 $4.996 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ ($74.891 \text{ pm}/^\circ\text{C}$),且拟合的线性度 R^2 均大于 0.999,表现出透射光谱共振峰偏移量与环境温度具有较好的线性拟合度,该系统能够准确反映环境温度大小。

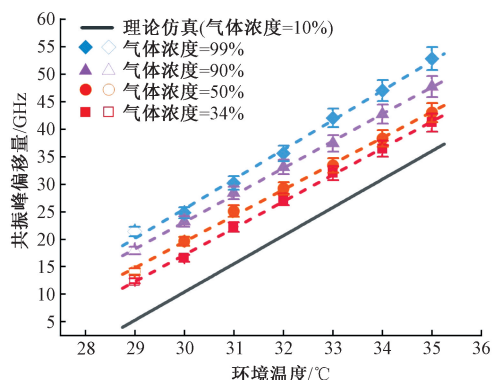


图9 透射谱共振峰偏移量随环境温度变化曲线

Fig. 9 Resonant wavelength variation of the transmission spectrum as a function of the environmental temperature

3) 实验结果分析与讨论

本文采用有限元软件建立了微环谐振腔的二维轴对称模型,并仿真了环境温度与气体浓度对谐振波长的偏移效果并对其进行拟合。值得注意的是,不同环境温度或气体浓度下的理论仿真结果是一系列上下平移的、斜率相同的直线,其斜率表示传感灵敏度,是我们关注的重点。因此,我们分别在环境温度为 34°C 与气体浓度为 10% 的条件下模拟了具有代表性的理论仿真结果,气体传感灵敏度与温度灵敏度的理论估计值分别为 $0.144 \text{ GHz}/\%$ 和 $5.129 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$,表明了实验结果合理性。另外,相较图 8、图 9 中的数据波动较小,这是由于腔内气体组分难以通过控制气流速来精确地、线性地控制,而环境温度则能够通过热电致冷器,实现

较为线性和准确地控制。这一现象也反映了传感系统中环境控制模块的重要性。此传感系统实现了对 $20\% \sim 80\%$ 气体浓度范围内共振峰偏移量的高线性度测量,同时也能够对此区间外的气体浓度进行测量。图 9 中虽包含了气体浓度为 90% 与 99% 的实验数据,但是该组数据相对于图 8 中拟合曲线的偏移量较大且不存在明显线性规律,因此,我们主要针对 $20\% \sim 80\%$ 气体浓度范围内的浓度变化进行了的测量标定。

4 结 论

本文提出了一种基于光栅耦合技术的光子芯片传感测试系统,实现了光栅自动耦合、环境控制与感知、以及数据处理与交互的功能。系统采用空间映射、图像处理 and 耦合功率三级耦合判据实现光纤与光栅之间快速准确的对准,提高了芯片检测效率。基于自主设计和流片制作的微环谐振器光芯片,实现了气体浓度和环境温度的传感,未来还可进一步实现湿度、气压、磁场、电场等环境参数的精密控制和测试。此检测系统能够对浓度为 $20\% \sim 80\%$ 之间的 CO_2 气体进行检测,灵敏度可以达到 $0.152 \text{ GHz}/\%$ ($2.113 \text{ pm}/\%$),所对应的折射率灵敏度平均值约为 $1500 \text{ nm}/\text{RIU}$;此外,此检测系统可以对 $30^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 之间的环境温度进行检测,灵敏度为 $4.996 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ ($74.891 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)。本文的工作为芯片级光学传感器的快速高效测试提供了技术方案。

参考文献

- [1] LI D F, ZHOU J K, YAO K M, et al. Touch IoT enabled by wireless self-sensing and haptic-reproducing electronic skin[J]. Science Advances, 2022, 8(51): ade2450.
- [2] BAO F L, WANG X J, SURESHBABU S H, et al. Heat-assisted detection and ranging[J]. Nature, 2023, 619(7971): 743-748.
- [3] LUO J J, WANG Z M, XU L, et al. Flexible and durable wood-based triboelectric nanogenerators for self-powered sensing in athletic big data analytics[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5147.
- [4] 徐荣靖, 张健, 陈恺, 等. 纳米材料修饰的光纤气体传感器研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 1-16.
- XU R J, ZHANG J, CHEN K, et al. Research progress of optical fiber gas sensors modified by nano-materials[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 1-16.

- 1-16.
- [5] VLK M, DATTA A, ALBERTI S, et al. Extraordinary evanescent field confinement waveguide sensor for mid-infrared trace gas spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 26.
- [6] LI H, XU M J, SONG H N, et al. A high-sensitivity air pressure sensor with short desorbing time [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108855.
- [7] 张雯, 熊洁, 李昊业, 等. 多光束干涉光纤 FP 探针脉动微压传感研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(7): 82-93.
- ZHANG W, XIONG J, LI H Y, et al. Research on the multi-beam interference optical fiber Fabry-Perot probe for pulsating micro-pressure sensing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(7): 82-93.
- [8] WANG L, HAO T F, LI G Y, et al. Microwave photonic temperature sensing based on fourier domain mode-locked OEO and temperature-to-time mapping [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5322-5327.
- [9] LI ZH B, WU Z Y, LI ZH Q, et al. High-sensitivity and fast-response fiber optic temperature sensor using an anti-resonant reflecting optical waveguide mechanism [J]. *Photonics Research*, 2023, 11(8): 1397-1407.
- [10] TONG Z J, ZHANG ZH, ZHANG ZH P, et al. Asymmetric structure optical fiber humidity sensor assisted by the virtual Vernier effect [J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 47216-47234.
- [11] GUO Y Y, LI X H, JIN M H, et al. Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range [J]. *APL Photonics*, 2022, 7(6): 066101.
- [12] ZHAO J, ZHANG S Y, SUN Y, et al. Wearable optical sensing in the medical internet of things (MIoT) for pervasive medicine: Opportunities and challenges [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(8): 2579-2599.
- [13] 胡语婵, 王文俟, 姜博, 等. 微纳激光传感:原理与应用 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2023, 53(11): 80-106.
- HU Y CH, WANG W Y, JIANG B, et al. Micro-and nano-laser sensing: Principles and applications [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2023, 53(11): 80-106.
- [14] 刘大建, 赵伟科, 张龙, 等. 高性能无源硅光波导器件:发展与挑战 [J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 222-238.
- LIU D J, ZHAO W K, ZHANG L, et al. High-performance passive silicon photonic waveguide devices: Progress and challenges [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 222-238.
- [15] 王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2015, 45(1): 15-45.
- WANG X J, SU ZH T, ZHOU ZH P. Recent progress of silicon photonics [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 45(1): 15-45.
- [16] SU Y K, ZHANG Y, QIU C Y, et al. Silicon photonic platform for passive waveguide devices: Materials, fabrication, and applications [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(8): 1901153.
- [17] ZHENG K Y, PI M Q, HUANG Y J, et al. Waveguide-based on-chip photothermal spectroscopy for gas sensing [J]. *Laser & Photonics Reviews* 18, 2024: 2301071.
- [18] MARCHETTI R, LACAVA C, CARROLL L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2019, 0(2): 201-239.
- [19] CHENG ZH ZH, TSANG H K. Experimental demonstration of polarization-insensitive air-cladding grating couplers for silicon-on-insulator waveguides [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2206-2209.
- [20] KANG J, CHENG ZH ZH, ZHOU W, et al. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane germanium waveguides [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2094-2097.
- [21] 程振洲, 贺祺, 刘怡辰, 等. 一种用于波导器件测试的芯片空间映射定位方法:CN116753837A [P]. 2023-09-15.
- CHENG ZH ZH, HE Q, LIU Y CH, et al. A chip space mapping location method for waveguide device testing: CN116753837A [P]. 2023-09-15.
- [22] 程振洲, 胡浩丰, 武靖雯, 等. 一种基于图像识别的光栅耦合器定位测量方法:CN112859256B [P]. 2022-07-08.
- CHENG ZH ZH, HU H F, WU J W, et al. A location measurement method of grating coupler based on image recognition: CN112859256B [P]. 2022-07-08.

[23] GUO R X, GAO H R, LIU T G, et al. Ultra-thin mid-infrared silicon grating coupler [J]. Optics Letters, 2022, 47(5): 1226-1229.

作者简介



刘星宇, 2023 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向为硅光传感器件。

E-mail: liuxingyu2023@tju.edu.cn

Liu Xingyu received his B. Sc. degree in 2023 from Tianjin University and is currently a graduate student there. His research interest is silicon photonic sensing devices.



程振洲(通信作者), 2006 年和 2009 年于南开大学分别获得学士和硕士学位, 2015 年于香港中文大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为硅基光子学。

E-mail: zhenzhoucheng@tju.edu.cn

Cheng Zhenzhou (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2006 and M. Sc. degree in 2009, both from Nankai University, and Ph. D. degree in 2015 from the Chinese University of Hong Kong. He is currently a professor at Tianjin University. His research interest is silicon photonics.