

引用格式: PI Mingquan, ZHENG Chuantao, LIANG Lei, et al. Progress of On-chip Infrared Gas Sensing Technique (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(3):0352106

皮明权, 郑传涛, 梁磊, 等. 片上红外气体传感技术的研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(3):0352106

片上红外气体传感技术的研究进展(特邀)

皮明权^{1,2}, 郑传涛^{1,2}, 梁磊³, 宋芳^{1,2}, 王一丁^{1,2}

(1 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 长春 130012)

(3 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 长春 130033)

摘 要:片上集成的光波导气体传感器具有体积小、重量轻、功耗低、无需光路校准等优点,近年来光学气体传感器逐渐由体积较大的分立系统向片上集成系统演变。中红外波段的气体吸收系数大,但二氧化硅在中红外波段的损耗较大,所以常用的绝缘衬底上的硅材料体系不适用于中红外波段。因此,片上气体传感器需要采用硫系玻璃、锗等中红外透明材料来拓宽工作波段。同时,波导结构直接影响了气体对光的吸收,而且气体传感技术也会影响传感器性能。本文总结了基于红外吸收光谱的片上气体传感器的最新进展。介绍了片上气体传感方法、波导材料、波导结构、片上气体传感的理论和实验进展。阐述了矩形波导、狭缝波导、悬浮波导、微环谐振波导和光子晶体波导在片上气体传感领域的应用现状。最后对基于红外吸收光谱的片上气体传感器进行了展望。

关键词:红外吸收光谱;气体传感器;光波导传感器;集成光学;可调谐半导体激光吸收光谱

中图分类号: TN252

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235203.0352106

0 引言

多数气体分子在近红外波段(0.8~2.5 μm)和中红外波段(2.5~20 μm)具有指纹吸收谱线,基于红外光谱法的气体检测技术具有选择性好、响应速度快等显著优点,在医疗卫生、环境监测等领域应用广泛^[1-3]。许多基于分立器件的检测技术被广泛应用于气体检测,例如直接吸收光谱(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)^[4-5]、波长调制光谱(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)^[6-7]、腔衰荡光谱(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)^[8-9]、腔增强吸收光谱(Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy, CEAS)^[10-11]、石英增强光声光谱(Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy, QEPAS)^[12-14]和光热干涉光谱(Photothermal Interferometry Spectroscopy, PTIS)^[15-16]。此外,傅里叶红外(Fourier Transform Infrared, FTIR)光谱仪也可以用于气体检测^[17-18]。虽然应用这些检测技术的传感器具有长光程,检测下限(Limit of Detection, LoD)可以达到十亿分之一(Parts Per Billion, ppb)量级,但该类系统体积庞大、不具有便携性、成本高、容易受环境振动的影响。利用其他检测技术的传感器,例如电化学传感器,需要高温来激活功能性材料^[19],这限制了传感器的工作温度。

半导体加工工艺的发展为片上气体传感器的实现奠定了基础。在过去的 20 年里,基于红外吸收光谱的片上气体传感器被广泛研究,实现了由理论到实验、由分立到集成的转变。2005 年, SIEBERT R 等^[20-21]首次提出了基于红外吸收光谱的片上气体传感器的系统设计和器件制备方法,为片上气体传感器的发展指明了方向。2011 年, LAI W 等^[22]首次使用基于分立测试系统的片上波导传感器检测了气体。2019 年, ZHANG

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 62175087, 62235016, 61960206004), 吉林省科技发展计划(No. 20200401059GX), 吉林省教育厅科技发展规划项目(No. JJKH20211088KJ), 长春市重点研发项目(No. 21ZGN24), 吉林大学科技创新团队项目(Nos. JLUSTIRT, 2021TD-39)

第一作者: 皮明权, pimq20@mails.jlu.edu.cn

通讯作者: 郑传涛, zhengchuantao@jlu.edu.cn

收稿日期: 2022-09-29; **录用日期:** 2022-11-08

<http://www.photon.ac.cn>

E J等^[23]首次在近红外实现了片上气体传感器的全集成并用于气体检测。与折射率传感法类似,片上气体传感器通过消逝场进行传感,体积小、便携、成本低。在单个芯片上集成激光器和探测器后,环境振动的影响可以被忽略,无需调节光路耦合。此外,光波导气体传感器是免标记的,而且其他的物理效应易与波导传感器结合^[24-29]。

本文关注了基于红外吸收光谱的片上气体传感器。首先,介绍了基于红外吸收光谱的片上气体传感器的传感方法;然后介绍了不同的波导材料和波导结构;然后介绍了片上气体传感器的发展现状;最后对基于红外吸收光谱的片上气体传感器的应用和发展方向做出了分析和总结。

1 片上气体传感方法

在传感时,气体分析物成为了波导的包层。部分光没有被限制在芯层中,被称为消逝场,并且分析物包层中的光与分析物相互作用。以矩形波导为例,矩形波导的上包层为气体,即气体既是包层材料,又是分析物,矩形波导的下包层为固体材料,上包层和下包层共同对芯层的光产生限制作用,准TE₀模式波导的光场分布如图1(a)所示,在xy平面和yz平面的波导消逝场分布如图1(b)和(c)所示。不同浓度分析物的折射率和消光系数影响了波导模式的有效折射率(Effective Refractive Index, N_{eff})和输出强度。穿透距离是从芯层到分析物包层的相互作用距离,可以表示为^[30]

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (1)$$

式中, n_1 和 n_2 分别是芯层和分析物的折射率, λ_0 和 θ 分别是入射光的波长和角度。已报道的基于红外吸收光谱的片上气体传感器的传感方法有DAS、WMS和微腔增强吸收光谱(Micro-Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy, MCEAS)。其他常用的片上传感方法是折射率传感,根据谐振峰或干涉峰随不同浓度分析物的红移或蓝移测定分析物,通过游标效应可以有效提高折射率传感器的灵敏度^[31],但是折射率传感不具有选择性,传感器会对具有不同折射率的待测物产生响应。

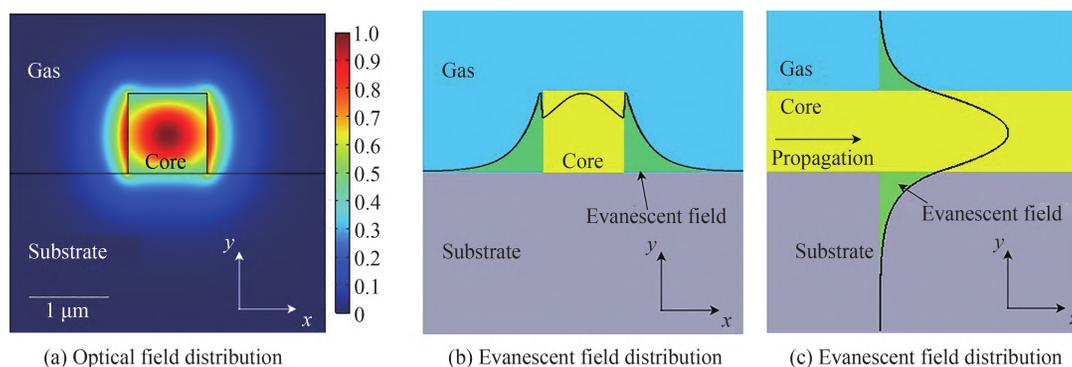


图1 波导的光场分布和消逝场分布

Fig. 1 Optical field distribution and evanescent field distribution of waveguide

1.1 直接吸收光谱

DAS是最常用的片上气体传感方法,其检测原理为朗伯-比尔定律,表示为^[32]

$$I = I_0 \exp(-ECF \alpha_{\text{gas}} CL - \alpha_{\text{int}} L) \quad (2)$$

式中, I 和 I_0 分别是耦合进入波导的光强和波导的输出光强。 α_{gas} 和 C 分别为气体的吸收系数和浓度。 L 为波导的长度, α_{int} 为波导在氮气环境下的固有损耗,此时氮气对光没有吸收。ECF为外限制因子,表示了气体与光的相互作用强度,表示为^[33]

$$ECF = \frac{n_g \iint_{\text{gas}} \epsilon(x, y) |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{\text{total}} \epsilon(x, y) |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (3)$$

式中, n_g 为群折射率, ϵ 为介电常数, E 为光波电场。 n_g 决定了模态增益的大小,剩余的积分部分表示了气体

包层区域能量密度的空间限制情况。

DAS技术通过检测有无待测物时波导输出光强的变化来检测待测物的浓度,图2(a)中,使用DAS技术检测待测物时,根据光强的变化直接获得吸光度。除了具有光程小的缺点,与基于分立单元的气体传感器相比,传感波导具有损耗,影响了输出光强的幅值,降低了信噪比。此外,分立式气体传感器利用自由空间光进行传感,所以分立传感系统的ECF为1,而片上气体传感器利用波导的消逝场进行传感,ECF一般小于1,这限制了吸收。除了图2(a)中展示的矩形波导结构,具有慢光效应^[22]和表面增强红外吸收效应^[34]的波导也可以用于DAS传感。慢光效应通过增加 n_g 来提高光与气体的相互作用效果,用于慢光传感的结构有亚波长光栅和光子晶体波导。通过在光子晶体波导中引入缺陷可以让光在某一路径中传输,与光子晶体波导相比,亚波长光栅的光栅周期可以随着波长的增加而增加,亚波长光栅的损耗低并且更容易制备^[35-36]。表面增强红外吸收效应利用波导表面粗糙的金属结构产生共振来增强吸收,但是金属结构会增加波导损耗^[34]。

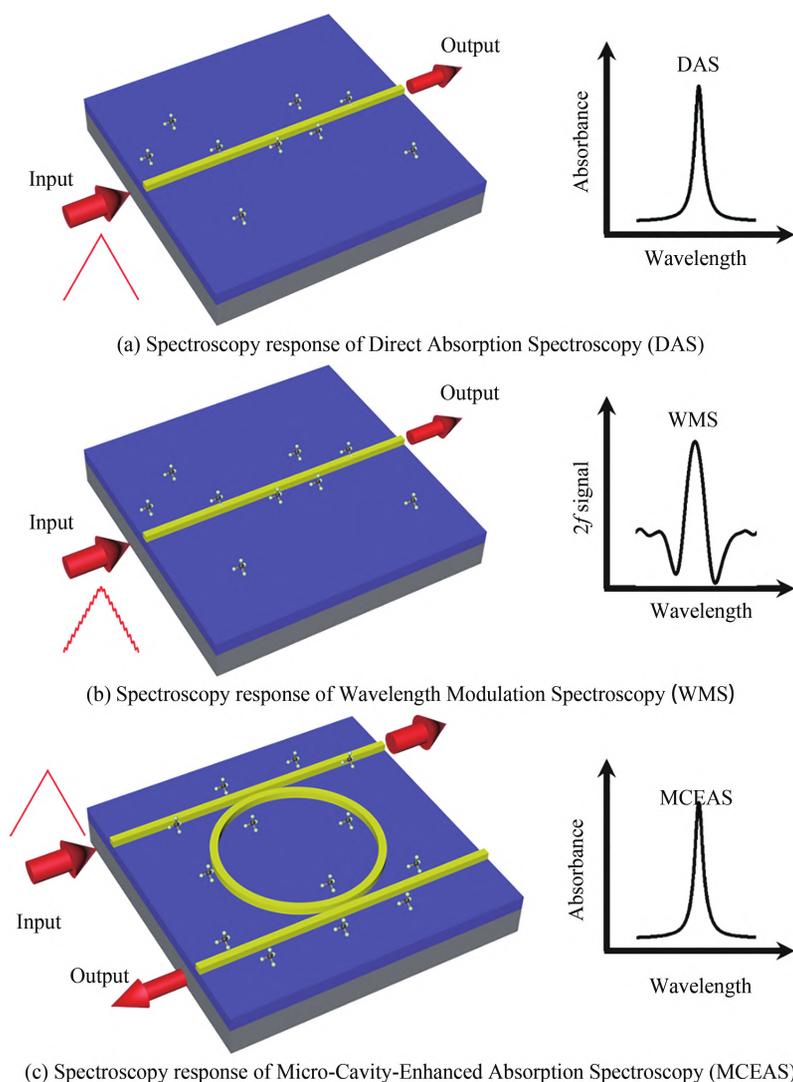


图2 不同片上传感技术的光谱响应

Fig. 2 Spectroscopy response of different on-chip sensing techniques

1.2 波长调制光谱

与DAS技术相比,WMS技术可以抑制噪声(例如 $1/f$ 噪声),提高片上气体传感器的性能。WMS技术在激光器驱动信号中叠加高频正弦波,通过锁相放大器对吸收信号进行解调,提取二次谐波^[7],图2(b)中表示使用WMS技术检测待测物时,可以根据二次谐波幅度的大小得到气体浓度。与DAS技术类似,与基于分立传感系统的WMS技术相比,传感波导的损耗会降低光功率,从而降低二次谐波的幅度,影响信噪比。

1.3 微腔增强吸收光谱

MCEAS技术利用环形谐振器(图2(c))对气体进行检测,耦合进入微腔中的光通过谐振使光程增加,通过检测谐振峰光强^[37]或者品质因数^[38]来获取气体浓度。当检测光强变化时,原理与DAS一样;当检测品质因数时,随着分析物浓度的增大,品质因数会降低。与CEAS技术相比,MCEAS技术中的波导微腔对应了CEAS技术中的具有高反射率透镜的谐振腔,环形波导与直波导耦合处的振幅传输系数和振幅透射系数分别对应了CEAS技术中的透镜反射率和透射率,波导的损耗也会限制MCEAS技术的性能。

2 片上气体传感器

通常, α_m 、ECF和 L 这三个参数共同影响片上传感器的性能。研究片上传感器的主要目标是降低检测下限,这决定了它的应用前景。提高片上气体传感器性能五个关键问题是:1)选择合适的芯层和包层材料,降低器件在工作波长的吸收损耗;2)选择和优化波导结构,提高ECF;3)考虑制备工艺的可行性和成本;4)根据 α_m 选择合适的 L ,提高信噪比;5)选择合适的光谱传感技术。

2.1 波导材料

当选择波导材料时,需要满足以下条件:1)波导材料应该在传感波长范围透明来减少材料的吸收损耗;2)芯层和包层的折射率差应该尽可能大,减小包层材料的折射率可以减少分布在包层和衬底的光,当芯层和包层的折射率差较大时,减小芯层的尺寸可以使更多的光分布在分析物包层中来获得大的ECF并满足导模条件;3)芯层材料的制备工艺需要与包层材料的性质兼容,例如,除了二氧化硅(SiO_2)外,难以制备晶体硅(Si)或将其键合在其他材料上^[39]。

常用的波导材料及其红外光学特性见表1。中红外波段的 α_{gas} 比近红外波段大,在相同光程下,中红外气体传感器性能更好。绝缘体上的硅(Silicon-On-Insulator, SOI)波导不适合用于中红外传感,因为 SiO_2 在中红外波段的吸收损耗更大^[40]。氮化物上的硅(Silicon-On-Nitride, SON)波导^[41]和蓝宝石上的硅(Silicon-On-Sapphire, SOS)波导^[42-44]吸收损耗很小。除了Si以外,锗(Ge)和硫系玻璃(ChG)在中红外波段具有较大的折射率,适合作为波导芯层。ChG主要包括硫族元素硫(S)、硒(Se)和碲(Te),还包括砷(As)、镓(Ga)、锑(Sb)和Ge等元素。由于ChG的转化温度低(150~500°C),因此除了刻蚀方法,ChG波导也可以使用剥离法制备,不会破坏光刻胶掩模的结构。通过改变ChG成分可以获得不同的光学特性,其中碲化物玻璃的透明波长可以达到20 μm ^[40]。根据波导导模的条件,表1中折射率比ChG低的材料都可以作为ChG波导的下包层材料。ChG上的ChG(Chalcogenide-On-Chalcogenide, COC)波导^[40,45]和 CaF_2 上的ChG(Chalcogenide-On-Fluoride, COF)波导^[46]都被提出用于中红外传感。虽然 SiO_2 不适合应用在中红外波段,但是其折射率低,适合作为近红外波导的下包层材料, SiO_2 上的ChG(ChG-On-Oxide, COO)波导^[47-50], SOI波导^[51-53]和 SiO_2 上的 Si_3N_4 (Nitride-On-Oxide, NOO)波导^[54-56]都被用于近红外气体传感。

表1 常用的波导材料及其红外光学特性
Table 1 Commonly used waveguide materials and infrared optical properties

Material	Refractive index	Infrared transparency window
Silicon, Si	~3.4	1~8 μm
Silica, SiO_2	~1.4	1~3.6 μm
Silicon nitride, Si_3N_4	~1.9	1~7 μm
Sapphire	~1.7	1~5.5 μm
Calcium fluoride, CaF_2	~1.4	1~9 μm
Germanium, Ge	~4	1.5~14.7 μm
Chalcogenide glass	~2~3	1~20 μm

2.2 波导结构

波导结构影响ECF,所以选择并优化波导结构很重要。在常规波导结构中,常用的消逝场传感波导结构如图3所示。最常用的结构为矩形和脊型结构,分别如图3(a)和(b)所示。自下向上,波导的各介质层依次为衬底、下包层、芯层,其余部分为气体包层。由于大部分光被限制在矩形波导和脊型波导的芯层中,导

致 ECF 较小。狭缝波导限制光在狭缝中传输,可以获得更大的 ECF, 竖直狭缝的结构如图 3(c)所示。但是竖直狭缝波导的狭缝区域需要通过干法刻蚀获得,使狭缝区域的侧壁粗糙,狭缝对光的限制使散射损耗高于矩形波导和脊型波导。此外,狭缝区域的宽度一般在 100 nm 左右,对光刻和刻蚀工艺有较高的要求。在考虑散射损耗后, TM 模式的 SOI 矩形波导的性能比 SOI 竖直狭缝波导的性能高 3 倍^[57]。水平狭缝波导可以通过湿法刻蚀制备^[58],结构如图 3(d)所示,狭缝区域的侧壁相对于竖直狭缝波导更光滑,所以具有更小的散射损耗^[37]。以上波导均为非悬浮结构的波导,有一部分光被限制在下包层中,限制了 ECF。基座波导为半悬浮结构的波导,可以通过刻蚀芯层底部进行制备^[59],结构如图 3(e)所示。基座波导通过基座结构支撑芯层,去除基座区域就可以充分利用下包层进行传感,这是悬浮波导的优势,其结构如图 3(f)所示,最常见的悬浮波导的芯层结构是脊形结构,通过芯层两侧未刻蚀的下包层进行支撑。

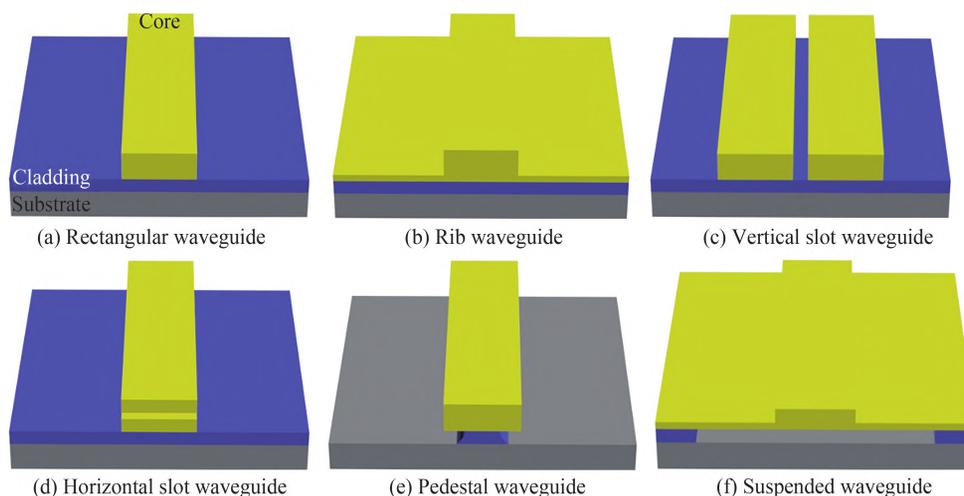


图 3 消逝场传感波导结构
Fig. 3 Evanescent field waveguide structure

一般情况下,传感波导的长度可大于 1 cm。如果波导的结构是直波导,器件的尺寸会变得更大。为了减小直波导在光传播方向的尺寸,可采用弯曲波导和螺旋波导,结构分别如图 4(a)和(b)所示。这时,需要考虑弯曲损耗的影响,对于 SOI 波导,考虑弯曲损耗时,弯曲半径可以 $< 50 \mu\text{m}$,而且 1 m 长的波导可以制备到 1 cm^2 的区域^[20-21]。TOMBEZ L 等^[52]提出了 SOI 弯曲波导气体传感器,传感波导长度为 10 cm,器件的尺寸为 16 mm^2 。HAN Z 等^[47]和 LIU Qiankun 等^[60]提出的 COO 螺旋波导传感器和 SiGe 螺旋波导传感器的最小半径分别为 $100 \mu\text{m}$ 和 $600 \mu\text{m}$ 。当半径大于 $70 \mu\text{m}$ 时,COO 波导的弯曲损耗可以忽略^[45]。综上所述,不同材料体系的波导传感器的弯曲半径应至少大于 $50 \mu\text{m}$ 。

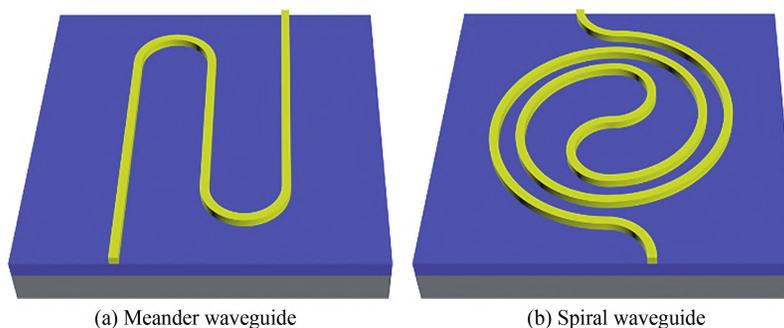


图 4 弯曲波导和螺旋波导结构
Fig. 4 Meander waveguide and spiral waveguide

除了常规结构的波导外,具有慢光效应的波导结构也可以应用于气体检测,慢光效应通过增加 n_g 并减小群速度来提高 ECF,增强光与分析物的作用。用于慢光传感的亚波长光栅和光子晶体波导的结构分别如图 5(a)和(b)所示,亚波长光栅为一维光子晶体结构,光子晶体波导为二维光子晶体结构。通过在光子晶体

波导中引入缺陷可以让光在某一路径中传输。与传统的狭缝波导类似,狭缝光子晶体波导将光限制在狭缝中,结构如图5(c)所示。狭缝亚波长光栅将狭缝结构引入亚波长光栅来提高传感性能,狭缝亚波长光栅的结构如图5(d)所示。与常规波导一样,悬浮结构也可以用于具有慢光效应的波导,悬浮亚波长光栅和悬浮狭缝光子晶体波导的结构分别如图5(e)和(f)所示。与光子晶体波导相比,亚波长光栅的损耗较低并且更容易制备^[35],因为亚波长光栅的光栅周期可以随着波长的增加而增加^[36]。

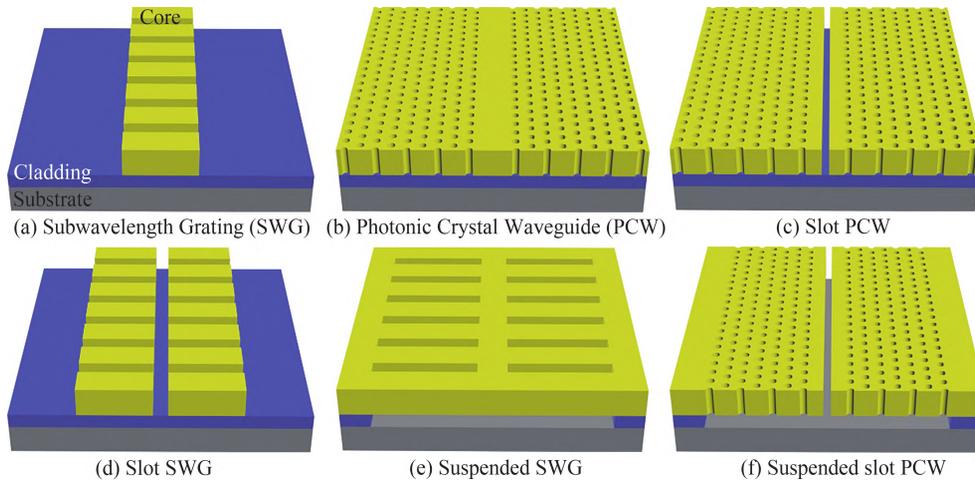


图5 具有慢光效应的波导结构
Fig. 5 Waveguide structure with slow light effect

2.3 片上气体传感器的理论设计

在制备片上气体传感器前,需要通过理论设计来优化结构,并提高传感器的性能。

2.3.1 矩形波导传感器

与脊形波导相比,矩形波导的制备工艺更简单,而且两种结构性能相近,所以矩形波导的理论研究工作和实验工作更多。矩形波导的结构较其他波导的结构最为简单,所以国内外的研究工作偏向于对不同材料体系和不同工作波长的矩形波导进行设计分析,工作波长多为中红外,难以在波导结构上进行改进。DAS技术通过光强的变化分析待测物的浓度,原理较其他技术简单,所以被广泛用于片上气体传感器的理论设计和实验中。

2016年,GUTIERREZ-ARROYO A等^[40]设计、优化并制备了COC矩形波导,用于在7.7 μm 波长处的 CH_4 和 N_2O 传感。芯层材料为 $\text{Ge}_{12.5}\text{Sb}_{25}\text{Se}_{62.5}$,包层材料为 $\text{Ge}_{28.1}\text{Sb}_{6.3}\text{Se}_{65.6}$,由于芯层和包层的折射率差很小,ECF仅有5%。理论分析结果表明, CH_4 和 N_2O 的LoD分别为14.2 ppm和1.6 ppm。2017年,GUTIERREZ-ARROYO A等^[30]优化了COC矩形波导,用于不同波段的多分析物传感,ECF只有8%。仿真了 CO_2 (4.3 μm)和 CH_4 (3.31 μm 和7.66 μm)的LoD,分别为0.268 ppm、1.848 ppm和0.781 ppm。同年,QIAO Yingying等^[61]优化了Si、 SiO_2 和 Si_3N_4 矩形波导用于在1 653 nm的 CH_4 传感, SiO_2 波导具有最大的ECF,达到了39.8%,因为具有高折射率的芯层限制了更多的光在其中,使ECF偏小。BUTT M A等^[62]优化了芯层为Si,下包层为 SiO_2 的矩形波导用于3.39 μm 的 CH_4 传感,波导在仿真区域中悬浮,ECF高于55%,因为芯层和包层的折射率差较大,而且 SiO_2 层的厚度约为0.2 μm ,这导致一部分光分布在底部的分析物包层。2018年,LIU Qiankun等^[60]提出了富含Ge的SiGe矩形波导,包层被部分刻蚀,它提供了从5.5 μm 到8.5 μm 的宽工作波长范围,波导的宽度为5 μm ,这使得更多光限制在芯层,所以ECF只有0.17%,而且在7.7 μm 波长处 CH_4 的LoD为366 ppm。2019年,BUTT M A等^[63]在芯层为Si、下包层为 SiO_2 的矩形波导的下包层中添加了一层Au来减小分布在衬底和芯层中的光,用于4.67 μm 波长处的CO传感。ECF达到了53%,这比没有Au层的波导高了约9%。XIN Yu等^[64]设计了具有大高宽比的SU-8矩形波导来增加波导芯层两侧的光场分布,用于近红外传感,优化的波导芯层宽度为0.8 μm ,高度为5 μm ,ECF超过了20%。HUANG Tianye等^[65]提出了具有双特性的矩形波导用于中红外3.1 μm 波长处 CH_4 传感,并通过二次谐波转换在近红外1.55 μm 波长处探测,这比直接在中红外吸收并在中红外探测的性能更好,因为中红外探测器的噪声更大。波导的芯层为聚合物,下包层为CdO,在100 mW的泵浦光条件下,LoD达到1.04 nmol/L。2020年,KOOMPAIN等^[66]设计了

芯层为 Si_3N_4 、下包层为 SiO_2 的矩形波导,用于 $2.7\sim 3.4\ \mu\text{m}$ 波段的气体检测,在该波段的 ECF 小于 10% ,对 H_2O 、 CO_2 、 N_2O 、 NH_3 、 C_2H_4 和 CH_4 等气体进行了检测并分析了性能,不同气体的 LoD $< 200\ \text{ppm}$ 。

使用多孔材料可以有效提高矩形波导的传感性能,孔中分布的气体也可以和光相互作用。2021年,ZEGADI Rami 等^[67]提出了 COC 波导和芯层和下包层都为多孔锗的矩形波导,COC 波导的芯层折射率为 2.69,包层折射率为 2.49,调节多孔锗的孔隙率,使芯层和包层的折射率与 COC 波导一致,孔隙的存在使芯层和包层中的部分光可以和气体相互作用。在 $4.3\ \mu\text{m}$ 波长处,COC 波导的 ECF 为 1% ,相同结构参数的多孔锗波导的 ECF 为 45.3% ,波导损耗为 $3\ \text{dB}/\text{cm}$ 时,两种波导对 CO_2 的 LoD 分别为 $5.63\ \text{ppm}$ 和 $0.12\ \text{ppm}$ 。在 $7.7\ \mu\text{m}$ 波长处,COC 波导的 ECF 为 1% ,相同结构参数的多孔锗波导的 ECF 为 44.7% ,波导损耗为 $3\ \text{dB}/\text{cm}$ 时,两种波导对 CH_4 的 LoD 分别为 $84.65\ \text{ppm}$ 和 $1.89\ \text{ppm}$ 。

矩形波导气体传感器的理论性能结果见表 2。

表 2 波导气体传感器性能的理论分析结果
Table 2 Theoretical analysis results of waveguide gas sensor performance

Reference	Material	Waveguide	Wavelength/ μm	Loss/ $(\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1})$	L/cm	ECF	Gas	LoD/ppm		
40	COC	Rectangular	7.7	2.5	1.7	5%	CH_4	14.2		
			7.7	2.5	1.7	5%	N_2O	1.6		
			4.3	1	4.3	8%	CO_2	0.268		
42	COC	Rectangular	3.31	1	4.3	8%	CH_4	1.848		
			7.66	1	4.3	8%	CH_4	0.781		
			Si	Rectangular	1.653	—	—	20%	CH_4	—
61	Si	Rectangular	Si_3N_4	Rectangular	1.653	—	39.5%	CH_4	—	
			SiO_2	Rectangular	1.653	—	39.8%	CH_4	—	
			Si	Slot	1.653	—	—	61.6%	CH_4	—
62	SOO	Rectangular	Si_3N_4	Slot	1.653	—	41.8%	CH_4	—	
			SiO_2	Slot	1.653	—	—	42.9%	CH_4	—
			SOO	Rectangular	3.39	—	—	55%	CH_4	—
60	SiGe	Rectangular	7.7	2	2.17	0.17%	CH_4	366		
63	Si- SiO_2	Rectangular	4.67	—	—	53%	CO	—		
64	SU-8	Rectangular	Near infrared	—	—	20%	—	—		
			2.71	—	—	—	H_2O	—		
			2.76	—	—	—	CO_2	—		
			2.896	—	—	—	NO_2	—		
			3	2	2	$< 10\%$	NH_3	< 200		
			3.2	—	—	—	C_2H_2	—		
66	NOO	Rectangular	3.315	—	—	—	CH_4	—		
			COC	4.3	3	1.44	1%	CO_2	5.63	
			Porous Ge	4.3	3	1.40	45.3%	CO_2	0.12	
			COC	7.7	3	1.45	1%	CH_4	84.65	
			Porous Ge	7.7	3	1.41	44.7%	CH_4	1.89	
68	SOI	Slot	1.55	—	—	45%	—	—		
		Rib slot	1.55	—	—	35%	—	—		
43	SOS	Slot	4.23	—	—	25%	CO_2	—		
41	SON	Slot	3	5	0.87	43%	NH_3	5		
69	InAs	Slot	7~8	—	—	—	CH_4	—		
70	SOO	Slot	3.39	—	—	47%	CH_4	—		
			4.47	3	1.44	68.0%	NH_3	0.214		
71	Si-on- CaF_2	Slot	4.6	3	1.44	66.6%	CO	0.436		
			3.67	3	1.44	65.4%	CH_4	36		

续表

Reference	Material	Waveguide	Wavelength/ μm	Loss/(dB $\cdot\text{cm}^{-1}$)	L/cm	ECF	Gas	LoD/ppm
32	ChG	Suspended slot	3.291	3	1.45	85.77%	CH ₄	1.70
72	SOI	Slot	1.645	1.6	3	27%	CH ₄	—
73	ChG	Suspended slot	3.67	2.2	1.954	93.81%	CH ₄	18.17
74	NOO	Slot	1.65	2	2	~18.5%	CH ₄	262
			1.85			~23%	H ₂ O	94.3
			1.95			~24.5%	NH ₃	136
			2			~24.5%	CO ₂	437
75	Ge-on-CaF ₂	Slot	3.31	3	0.86	22%	CH ₄	—
37	ChG-on-CaF ₂	Slot racetrack resonator	3.291	3	0.094	44.63%	CH ₄	3.87
76	SOI	Slot photonic crystal	1.53	—	0.03	—	C ₂ H ₂	3.15
36	SOI	Subwavelength grating	1.651	3	1.44	—	CH ₄	2.8
79	SOI	Slot subwavelength grating	1.651	3	1.45	51.8%	CH ₄	0.034

2.3.2 狭缝波导传感器

与矩形波导气体传感器的研究进展类似,早期人们对狭缝波导气体传感器的研究工作主要是针对不同材料和不同工作波长进行的。2007年,DELL'OLIO F等^[68]在波长为1 550 nm处优化了SOI垂直狭缝波导和SOI垂直脊型狭缝波导。垂直脊型狭缝波导对应了未完全刻蚀的情况。优化后的垂直狭缝波导和垂直脊型狭缝波导的ECF分别高于45%和35%,同时研究了侧壁倾斜角度的影响,非垂直侧壁会减小狭缝波导的ECF,但是对垂直脊型狭缝波导的有效折射率影响较小。

2014年,HUANG Yuewang等^[43]优化了在波长为4.23 μm 用于CO₂传感的SOS矩形波导,脊型波导和垂直狭缝波导,垂直狭缝波导的ECF比另外两种结构大,超过了25%。研究了不同探测器对传感器性能的影响,冷却的InSb探测器、室温的HgCdTe探测器和室温的PbSe探测器被用于检测CO₂时,LoD分别为2 ppm、5 ppm和50 ppm。此外,研究了波导长度对灵敏度和LoD的影响。2016年,KUMARI Babita等^[41]优化了在3 μm 波长处用于NH₃传感的SON垂直狭缝波导,ECF达到了43%,波导长度为8.7 mm时,LoD为5 ppm。制备误差和温湿度对ECF影响较小。

2017年,QIAO Yingying等^[61]优化了Si、SiO₂和Si₃N₄垂直狭缝波导,用于波长为1 653 nm的CH₄传感,波导的包层为气体。具有高折射率的芯层限制了更多的光在狭缝中,所以Si波导具有最大的ECF,达到了61.6%。同年,ELSAYED M Y等^[69]提出了高度n型掺杂的InAs等离子体垂直狭缝波导用于中红外的CH₄和辛烷传感,仿真的输出光谱中得到分析物的吸收,等离子体波导的材料已经被用于制备片上光源和探测器,所以基于该材料的集成片上气体传感器可以被实现。

2018年,BUTT M A等^[70]优化了芯层为Si、下包层为SiO₂的垂直狭缝波导用于3.39 μm 波长处的CH₄传感,ECF达到了47%。

除了材料体系和工作波长的改变,其他新颖的具有更好性能的狭缝波导结构被提出,传感波导的结构不再局限于传统的狭缝波导。2018年,KUMARI B等^[71]提出了芯层为Si、衬底为CaF₂的脊型水平双狭缝波导用于不同波长的多分析物传感,引入脊形结构来提高ECF。传感器可以用于不同波长的气体检测,ECF在波长为4.47 μm 处达到了68.0%,对应N₂O的LoD为0.214 ppm;ECF在4.6 μm 波长处为66.6%,对应CO的LoD为0.436 ppm;ECF在3.67 μm 处为65.4%,对应CH₄的LoD为36 ppm。传感器的响应时间为10 s。制备误差对ECF的影响较小。

2019年,ZHENG Chuantao等^[32]提出了芯层为ChG(As₂Se₃)、下包层为SiO₂和气体的悬浮垂直狭缝波导,用于3 291 nm波长处的CH₄传感,优化结构后的ECF为85.77%。SiO₂支撑层远离芯层,所以SiO₂的吸收可以

被忽略。狭缝结构和平板层结构共同引导光的传输,而且芯层底部的悬浮区域也被用于传感。仿真结果表明,CH₄的检测下限为1.70 ppm,响应时间小于3 μs。温度和压强变化、工艺误差的影响对传感性能的影响很小。同年,QIAO Yingying等^[72]仿真并制备了一个在1 645 nm处用于CH₄传感的密封型垂直狭缝波导,芯层为Si、上包层和下包层为SiO₂,狭缝中为气体,ECF达到了27%。密封型垂直狭缝波导避免了灰尘的影响,测试的传输损耗为1.6 dB/cm,仿真波导长度为3 cm时的LoD为44 ppm,所需的最小检测气体量为480 μm³。

2021年,WANG Yuefeng等^[73]提出了芯层为ChG(Ge-Sb-Se)的悬浮垂直狭缝波导,ECF在3.67 μm达到了93.81%,对CH₄的LoD为18.17 ppm,在3~4.4 μm波长范围内的ECF大于90%。

狭缝波导气体传感器的理论性能结果在表2中。

2.3.3 微环谐振器传感器

基于红外吸收光谱的微环谐振器气体传感器的理论研究工作较少。2020年,ZHENG Chuantao等^[37]提出了水平狭缝波导跑道谐振器,用于CH₄传感,波导的芯层为ChG(As₂Se₃)、下包层为CaF₂,提出了一种等效传感器模型及其相关公式,将跑道谐振器等效为直波导,简化了跑道谐振器传感器模型的分析。波导在3 291 nm处的ECF为44.63%,跑道谐振器使波导的物理长度缩短了30倍,并且传感器的有效光程和LoD分别为2.4 cm和3.87 ppm。

2.3.4 光子晶体波导传感器

光子晶体波导传感器的结构较矩形波导传感器和狭缝波导传感器的结构更为复杂,更容易在结构上进行改进以获得更好的性能,但是其制备难度更大,SOI器件的制备工艺较其他材料体系的器件更为成熟,所以在设计优化光子晶体波导传感器时,一般使用SOI平台。

2013年,ZHANG Yanan等^[76]在1 530 nm处通过移动狭缝附近的两排气孔优化了SOI狭缝光子晶体波导,用于C₂H₂传感,优化后 n_g 达到了110,传感波导长度为300 μm时,LoD为3.15 ppm。

2017年,JANNESARI R等^[77]通过去除Si棒优化了SOI光子晶体环形谐振器用于中红外的气体传感,品质因数达到了 3.85×10^5 ,而且群速度达到了 $7 \times 10^{-4}c$ 。

光子晶体波导中nm量级尺寸的微结构对制备工艺要求极高,所以人们开始对相对容易制备的亚波长光栅气体传感器进行理论研究。尽管亚波长光栅被提出用于折射率传感,但是并没有使用慢光效应^[78]。2019年,GERVAIS A等^[36]设计了SOI亚波长光栅用于1 651 nm波长处的CH₄传感,优化的亚波长光栅的 n_g 和ECF分别达到了5.6和1.1。亚波长光栅在长度为1.44 cm时的LoD为2.8 ppm。2020年,XU Guizhen等^[79]优化了狭缝亚波长光栅用于1 651 nm处的CH₄传感,优化后, n_g 和ECF分别达到了4.50和2.306。在长度为1.45 cm时的检测下限为0.034 ppm。

光子晶体波导气体传感器的理论性能结果见表2。

2.4 片上气体传感器的实验进展

2.4.1 矩形波导传感器

早期,人们主要研究了非集成的矩形波导气体传感器,并使用DAS技术进行气体传感实验。2013年,STERN L等^[80]使用了NOO矩形波导用于795 nm波长处的铷蒸汽传感。波导和一个柱状体键合作为气室,ECF为10.9%,展示了片上纳米尺度引导的光学模式与铷原子在线性和非线性状态下的相互作用。

2016年,HAN Z等^[47]使用了一个长2 cm的COO螺旋矩形波导用于3.31 μm的CH₄传感,LoD为2.5%。波导的损耗达到了7 dB/cm,并且每个端面的耦合损耗为5 dB。

2017年,TOMBEZ L等^[52]使用了一个长为10 cm的SOI弯曲矩形波导用于1 651 nm波长处的CH₄传感,如图6(a)所示。与波导相同长度的参考气室被用来获取波导实际的ECF,实际的ECF达到了25.4%。在积分时间为1 min时,LoD为100 ppm,与其他基于DAS的矩形波导传感器相比是最小的。

2018年,SINGH R等^[48]使用了一个长度为1 cm的COO螺旋矩形波导,用于3.25 μm到3.35 μm波长的气溶胶传感。N-甲基苯胺气溶胶粒子由雾化器和干燥器产生,检测的吸收光谱和美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology,NIST)数据库一致,解决了现有的基于拉曼光谱、傅里叶红外光谱仪、荧光显微镜的检测设备体积庞大、小型化的手持式仪器灵敏度低的问题。同年,RANACHER C等^[81-82]使用SON矩形波导用于在4.26 μm的CO₂传感。通过参考气室的吸收得到了实际的ECF为14%~

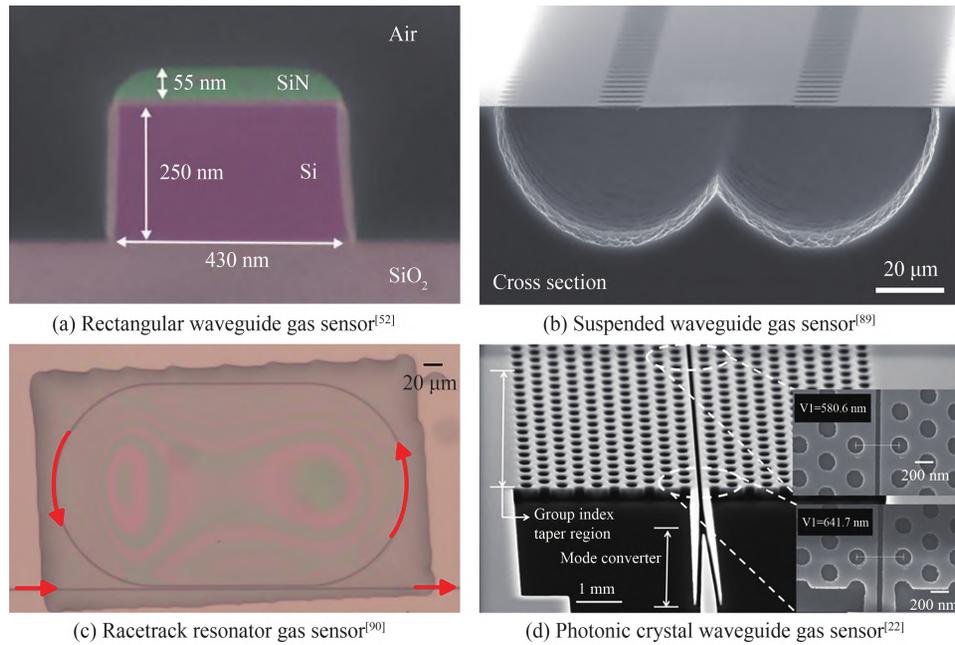


图6 非集成的光波导气体传感器
Fig. 6 Non-integrated optical waveguide gas sensor

16%。波导的长度为2 cm时,LoD为500 ppm。通过刻蚀Si衬底和SiO₂,ECF提高到19.5%,长度为1 cm的波导的检测下限为5 000 ppm。

之后,矩形波导开始逐渐与光源、探测器集成,并用于气体传感。2018年,CONSANI C等^[83]将热发射器与SON矩形波导集成,用于中红外CO₂传感。ECF仅为3.3%,LoD为10%,LoD仅比使用量子级联激光器(Quantum Cascade Laser,QCL)的同类波导传感器大了一倍左右^[84],证明了利用集成热发射器的波导在中红外环境中进行气体检测的可行性。

2019年,SU P等^[50]提出了一种集成PbTe光电导探测器的COO螺旋波导,用于CH₄传感,吸收波长为3.31 μm,ECF为12.5%,波导长度为1 cm,LoD为1%。同年,ZHANG E J等^[23]制备了用于1 651 nm波长处CH₄传感的光子集成芯片,如图7(a)所示,光子集成芯片包含了外腔激光器、SOI传感波导、用于实时校准的密封了CH₄的气室和探测器,波导传感外壳由透气膜包裹,这避免了灰尘污染,20 cm长的波导在积分时间小于1 s时的LoD<100 ppm,光子集成芯片传感器可用于配置无线传感器网络。

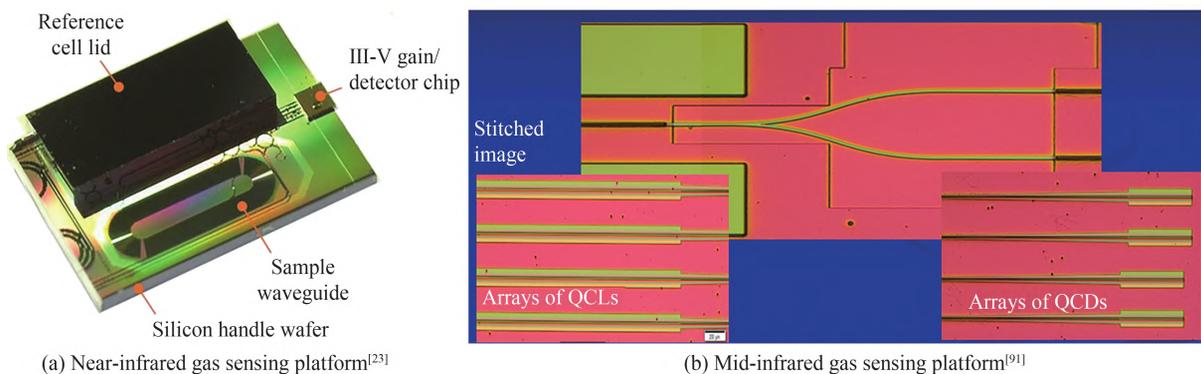


图7 全集成的片上气体传感平台
Fig. 7 Fully integrated on-chip gas sensing platform

具有吸附气体的功能材料也可以用于光波导气体检测。2021年,AL H D等^[85]将聚合物/介孔SiO₂纳米颗粒沉积在了SOI矩形波导表面,用于吸附CH₄气体,研究了涂层沉积条件对装配的厚度和均匀性的影响,检测了吸收波长为3.32 μm的CH₄气体和吸收波长为3.35 μm的乙醇蒸汽,与未涂覆纳米颗粒的波导

相比,涂覆纳米颗粒的波导检测气体时,吸光度分别提高了2倍和15倍,而且传感器具有可逆的测量结果。

除了DAS技术外,WMS技术和表面增强红外吸收(Surface-Enhanced Infrared Absorption, SEIRA)光谱技术也开始应用于片上气体传感。2021年,ZHENG Chuantao等^[86]提出了芯层为ChG($\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$),下包层为 MgF_2 的矩形波导,用于波长为4 319 nm的 CO_2 传感。 MgF_2 的折射率为1.34,较其他材料的折射率小,可以减小分布在下包层中的光,用于提高ECF,实验得到的ECF为4.6%。使用WMS技术进行传感后,LoD为0.3%,与DAS相比降低了8倍。同年,ZHENG Chuantao等^[34]通过倾斜角度沉积法在COO矩形波导的表面制备了不同厚度的银岛膜来产生表面增强红外吸收效应,用于波长为3 291 nm的 CH_4 传感,银岛的数量和间距会影响共振效果,实验表明银岛膜厚度为1.8 nm时的增强效果最好,吸光度增强因子为2.3,积分时间为50.6 s时的检测下限为0.61%,并且进行了页岩气检测,表明了传感器的应用前景。

2022年,ZHENG Chuantao等^[87]研究了波导的ECF、损耗和长度对WMS技术的影响。增强吸收会使二次谐波幅值增加,而增加损耗会降低波导的输出功率,降低二次谐波幅值,所以存在最佳波导长度。在评估波导损耗后,仿真表明使用长度为1 cm和2 cm的波导进行传感,可以减小损耗误差带来的影响,获得更大的二次谐波幅值。使用芯层为ChG($\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$),下包层为 MgF_2 的矩形波导用于波长为3 291 nm波长的 CH_4 传感,在最佳积分时间为32.4 s时,2 cm长的波导的LoD为140.8 ppm;在最佳积分时间为81.8 s时,1 cm长的波导的LoD为396.7 ppm。实验测得的波导的二次谐波幅值与仿真结果一致,并且2 cm长的波导的二次谐波幅值是仿真的最优长度(2.7 cm)情况下二次谐波幅值的0.97倍,减小了损耗误差带来的影响。

矩形波导气体传感器的传感性能如表3所示。

表3 波导气体传感器的实验性能结果
Table 3 Experimental performance results of waveguide gas sensor

Reference	Material	Waveguide	Wavelength/ μm	Loss/ ($\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$)	L/cm	ECF	Gas	LoD(ppm)/ τ (s)
80	NOO	Rectangular	0.975	—	—	10.9%	Rb	—
47	COO	Rectangular	3.31	7	2	8%	CH_4	25 000/—
52	SOI	Rectangular	1.651	2	10	25.4%	CH_4	100/60
48	COO	Rectangular	3.25~3.35	—	1	—	N-methyl aniline-based aerosol	—
81	SON	Rectangular	4.36	3.98	2	14~16%	CO_2	500
82	SON	Rectangular	4.36	—	1	19.5%	CO_2	5 000
83	SON	Rectangular	Mid-infrared	—	—	3.3%	CO_2	100 000
50	COO	Rectangular	3.31	8	1	12.5%	CH_4	10 000
23	SOI	Rectangular	1.651	—	20	—	CH_4	~100/~1
85	SOI	Rectangular	3.32 3.35	2	—	—	CH_4 Ethanol vapour	— —
86	ChG-on- MgF_2	Rectangular	4.319	5.1	1	4.6%	CO_2	3 000/0.2 (WMS)
34	COO	Rectangular	3.291	3.6	2	0.5%	CH_4	6 100/50.6 396.7/81.8 (WMS)
87	ChG-on- MgF_2	Rectangular	3.291	1.52	1 2	7.8%	CH_4	140.8/32.4 (WMS)
88	SOI	Suspended rectangular	4.24	2.9	0.32	44%	CO_2	1 000/—
89	Ta_2O_5	Suspended rib	2.566	6.8	2	107%	C_2H_2	7/25

续表

Reference	Material	Waveguide	Wavelength/ μm	Loss/ ($\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$)	L/cm	ECF	Gas	LoD(ppm)/ $\tau(\text{s})$
90	NOO	Rectangular racetrack resonator	1.42	—	—	—	Dimethylmethylphosphonate Acetone Nitrobenzene	0.002/— 140/— 1.5/—
38	SOS	Rectangular ring resonator	4.46	—	0.1	—	N_2O	5 000/—
56	NOO	Rectangular racetrack resonator	1.5~1.6	—	—	—	N-methyl aniline aerosols	—
20	SOI	Slot photonic crystal	1.66	—	0.03	—	CH_4	100/—
35	InGaAs-on-InP	Suspended photonic crystal	6.15	39.1	0.1	12%	NH_3	0.232/—
		Suspended subwavelength grating		4.1	0.3	10%		0.084/—
92	SOI	Suspended subwavelength grating	6.65	4.3	2.84	24.3%	Toluene vapour	75/—
93	SOI	Photonic crystal	3.4	—	0.9	17.1%	Ethanol vapour	0.250/—
94	SOI	Suspended subwavelength grating	7.33	4.7	1	113%	Acetone vapour	2.5/20 10/0.03

2.4.2 悬浮波导传感器

悬浮波导的气体传感实验进展比矩形波导晚,因为其制备工艺难度更大。2020年,OTTONELLO-BRIANO F等^[88]制备了SOI悬浮矩形波导用于 $4.24\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 传感,悬浮波导的宽度为 $2.2\ \mu\text{m}$,在每 $100\ \mu\text{m}$ 长的波导中,波导的宽度从 $2.2\ \mu\text{m}$ 过渡为 $9\ \mu\text{m}$ 宽、 $17\ \mu\text{m}$ 长的锥形支撑区域,当腐蚀 SiO_2 时,锥形支撑区域底部保留了用于支撑的 SiO_2 结构。悬浮波导的ECF为44%,损耗为 $2.9\ \text{dB}/\text{cm}$,波导长度为 $3.2\ \text{mm}$ 时的LoD为0.1%。

2021年,VLK M等^[89]制备了芯层为 Ta_2O_5 的悬浮脊形波导用于 $2.566\ \mu\text{m}$ 的 C_2H_2 传感,如图6(b)所示,在芯层两侧的平板中制备孔洞用于腐蚀芯层底部的 SiO_2 ,悬浮结构由芯层两侧底部未被腐蚀的 SiO_2 支撑。悬浮波导的ECF为107%,得到了比自由空间光更强的吸收,损耗为 $6.8\ \text{dB}/\text{cm}$, $2\ \text{cm}$ 长的波导在积分时间为 $25\ \text{s}$ 时的LoD为7 ppm。

悬浮波导气体传感器的传感性能如表3所示。

2.4.3 微环谐振器传感器

微环谐振器气体传感器的研究工作主要针对化学蒸汽或气溶胶,因为其吸收峰足够宽,不需要考虑气体吸收峰和微腔谐振峰的对齐问题,降低了对器件的要求。2014年,STIEVATER T H等^[90]将NOO矩形波导跑道形谐振器用于 $1\ 420\ \text{nm}$ 波长附近的二甲基膦酸盐(Dimethylmethylphosphonate, DMMP)蒸气、丙酮蒸气和硝基苯(Nitrobenzene, NB)蒸气传感,如图6(c)所示。在跑道形谐振器上涂覆聚合物(HCSFA2)吸附蒸汽。DMMP、丙酮和NB的LoD分别为 $0.002\ \text{ppm}$ 、 $140\ \text{ppm}$ 和 $1.5\ \text{ppm}$ 。DMMP、丙酮和NB的吸附时间和解除吸附时间分别为 $\sim 1\ \text{h}$ 、 $\sim 1\ \text{min}$ 和 $\sim 1\ \text{min}$ 。减小聚合物厚度可以在不牺牲灵敏度的前提下缩短吸附时间和解除吸附时间。

2015年,SMITH C J等^[38]将SOS矩形波导微环谐振器用于 N_2O 传感,在 $2\ 241.79\text{ cm}^{-1}$ 处的ECF为10%。浓度为5 000 ppm的 N_2O 使品质因数由 $\sim 43\ 200$ 降至 $\sim 41\ 400$,有效光程约为1 mm。远离 N_2O 吸收线的谐振峰品质因数没有变化。

2019年,SINGH R等^[56]使用NOO矩形波导跑道形谐振器在1 500~1 600 nm波段检测了基于N-甲基苯胺的气溶胶。传感器暴露在气溶胶环境时,谐振峰产生红移,品质因数降低,使用跑道形谐振器检测到的吸收光谱与商用光谱仪一致。

微环谐振器传感器的传感性能如表3所示。

2.4.4 光子晶体波导传感器

2011年,LAI Weicheng等^[22]使用SOI孔状光子晶体狭缝波导传感器在 $\sim 1.66\ \mu\text{m}$ 波长处检测了 CH_4 气体,如图6(d)所示,300 μm 长的波导的LoD为100 ppm,实验测得的 n_g 为30。

2019年,CHAKRAVARTY S等^[91]提出了单片集成了QCL、量子级联探测器(Quantum Cascade Detector, QCD)和光子晶体波导的InGaAs-InP中红外气体传感平台,如图7(b)所示,InGaAs-InP传感平台可以覆盖3~15 μm 的工作波段,但是气体传感实验并没有开展。

之后光子晶体波导传感器的实验工作也开始结合悬浮结构来增强光与气体的作用效果,并用于化学蒸汽传感。2020年,YOO K M等^[35]提出了一种用于6.15 μm 波长处进行 NH_3 传感的孔状悬浮光子晶体波导和悬浮亚波长光栅,芯层和包层材料分别为InGaAs和InP,InGaAs-InP平台易于与激光器和探测器集成。悬浮亚波长光栅的损耗仅为4.1 dB/cm, n_g 为15,ECF为10%,3 mm长的波导的LoD为84 ppb。悬浮光子晶体波导的损耗高达39.1 dB/cm, n_g 为39,ECF为12%,1 mm长的波导的LoD为232 ppb。同时,悬浮光子晶体波导只能引导TE模的光,而悬浮亚波长光栅能引导TE/TM模光,因此悬浮光子晶体波导需要一个额外的偏振旋转器。从以上条件来看,悬浮亚波长光栅更适合用于片上气体传感。

2021年,LIU Weixin等^[92]提出了一种用于6.65 μm 处进行甲苯蒸气传感的SOI悬浮亚波长光栅,器件包含了光栅耦合器、Y形分束器和定向耦合器,仿真的ECF为24.3%,传感波导长度为28.4 mm,在6.4~6.8 μm 范围内波导损耗为4.3 dB/cm,LoD为75 ppm。同年,ROSTAMIAN A等^[93]提出了一种用于3.4 μm 处进行乙醇蒸气传感的SOI孔状光子晶体波导, n_g 达到了73,ECF为17.1%,9 mm长的波导的LoD为250 ppb。

2022年,LIU Weixin等^[94]提出了一种用于7.33 μm 处进行丙酮蒸气传感的SOI悬浮亚波长光栅,ECF为113%,损耗为4.7 dB/cm,长度为10 mm的波导在20 s的积分时间的LoD为2.5 ppm,积分时间为0.03 s时的LoD为10 ppm。

光子晶体波导传感器的传感性能如表3所示。

3 总结与展望

基于红外吸收光谱的集成光子气体传感器在痕量气体传感中具有重要意义。在本文中,总结了基于红外吸收光谱的片上气体传感器的最新进展。阐述了片上气体传感方法、用于传感的波导材料体系、波导结构对性能的影响、片上气体传感的理论进展和实验进展。在传感理论和实验进展中,介绍了矩形波导、悬浮波导、微环谐振器和光子晶体波导在片上气体传感领域的发展现状。

目前,全集成的片上传感器已经被报道,所以片上气体传感器在实际应用中具有可行性,但是片上气体传感器仍然存在着许多科学问题,直接影响了传感器的性能,仍有很大的发展空间。1)片上气体传感最大的优势是小型化,但是光源、传感波导和探测器的单片集成技术仍有待发展,这限制了片上气体传感器的应用,此外,还需要传感波导的材料体系和制备工艺与光源和探测器兼容。2)可以使用新型红外透明材料制备光波导,降低材料的吸收损耗。3)片上气体传感器的长度也限制了灵敏度,可以通过其他的物理效应增强传感器的灵敏度,例如表面增强红外吸收效应、光热效应和吸附效应,但是这也会引入新的问题:表面增强红外吸收效应会提高波导的损耗,光热效应会增加器件的复杂度,吸附效应会增加传感器的响应时间。所以,需要同时考虑物理效应带来的负面影响在实际应用中是否可以接受。4)光波导的结构直接影响了外限制因子的大小,需要在满足单片集成和具有较大外限制因子的前提下尽可能的降低工艺难度,以实现大批量生产。5)先进的传感技术(例如,波长调制光谱技术和光热干涉光谱技术)可以降低传感器的噪声水平

并提高灵敏度,但是这也引入了更多的电学模块,所以同时需要考虑信号处理单元等电学模块的芯片化,以实现传感系统的小型化。

参考文献

- [1] GAO Lifang, YANG Xu, SHU Yang, et al. Ionic liquid-based slab optical waveguide sensor for the detection of ammonia in human breath[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 512: 819-825.
- [2] CHEN Jiao, HOKAZONO H, NAKASHIMA D, et al. Low loss silica high-mesa waveguide for infrared sensing[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(2): 022502.
- [3] LIU Zhiwei, ZHENG Chuantao, ZHANG Tianyu, et al. Midinfrared sensor system based on tunable laser absorption spectroscopy for dissolved carbon dioxide analysis in the south china sea: system-level integration and deployment[J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(12): 8178-8185.
- [4] SONG Fang, ZHENG Chuantao, YAN Wanhong, et al. Performance enhancement of methane detection using a novel self-adaptive mid-infrared absorption spectroscopy technique[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 6804512.
- [5] SONG Fang, ZHENG Chuantao, YAN Wanhong, et al. Interband cascade laser based mid-infrared methane sensor system using a novel electrical-domain self-adaptive direct laser absorption spectroscopy (SA-DLAS)[J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31876-31888.
- [6] ZHONG Guoqiang, MA Zhuo, WANG Junbo, et al. Near-infrared tunable laser absorption spectroscopic acetylene sensor system using a novel three mirror-based, dense pattern gas cell[J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1266.
- [7] LIU Zhiwei, ZHENG Chuantao, CHEN Chen, et al. ICL-based mid-infrared carbon dioxide sensor system for deep-sea natural gas hydrate exploration[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5598-5609.
- [8] JIN Huawei, HU Renzhi, XIE Pinhua, et al. Study on the photoacoustic technology to simultaneous in-situ detection of the cavity ring-down spectrum for multi-optical parameters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 6800711.
- [9] WENG Yongbiao, TOUZEAU A, SODEMANN H. Correcting the impact of the isotope composition on the mixing ratio dependency of water vapour isotope measurements with cavity ring-down spectrometers[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(6): 3167-3190.
- [10] ZHENG Kaiyuan, ZHENG Chuantao, LI Junhao, et al. Near-infrared methane sensor system using off-axis integrated cavity output spectroscopy with novel dual-input dual-output coupling scheme for mode noise suppression[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 308: 127674.
- [11] ZHENG Kaiyuan, ZHENG Chuantao, MA Ningning, et al. Near-infrared broadband cavity-enhanced spectroscopic multigas sensor using a 1650 nm light emitting diode[J]. *ACS Sensors*, 2019, 4(7): 1899-1908.
- [12] HU Lien, ZHENG Chuantao, ZHANG Minghui, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopic methane sensor system using a quartz tuning fork-embedded, double-pass and off-beam configuration[J]. *Photoacoustics*, 2020, 18: 100174.
- [13] HU Lien, ZHENG Chuantao, ZHANG Yu, et al. Compact all-fiber light-induced thermoelastic spectroscopy for gas sensing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1894-1897.
- [14] HU Lien, ZHENG Chuantao, ZHENG Jie, et al. Quartz tuning fork embedded off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(10): 2562-2565.
- [15] BAO Haihong, HONG Yingzhen, JIN Wei, et al. Modeling and performance evaluation of in-line Fabry-Perot photothermal gas sensors with hollow-core optical fibers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5423-5435.
- [16] LIN Yuechuan, LIU Fei, HE Xiangge, et al. Distributed gas sensing with optical fibre photothermal interferometry[J]. *Optics Express*, 2020, 25(25): 31568-31585.
- [17] CHONG Xinyuan, ZHANG Yujing, LI Erwen, et al. Surface-enhanced infrared absorption: pushing the frontier for on-chip gas sensing[J]. *ACS Sensors*, 2018, 3(1): 230-238.
- [18] KIM K, CHONG Xinyuan, KREIDER P B, et al. Plasmonics-enhanced metal-organic framework nanoporous films for highly sensitive near-infrared absorption[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(12): 2763-2767.
- [19] AKBAR S, DUTTA P, LEE C. High-temperature ceramic gas sensors: a review[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2006, 3(4): 302-311.
- [20] SIEBERT R, MULLER J. Infrared integrated optical evanescent field sensor for gas analysis part I: system design[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 119(1): 138-149.
- [21] SIEBERT R, MULLER J. Infrared integrated optical evanescent field sensor for gas analysis part II: fabrication[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 119(2): 584-592.
- [22] LAI W, CHAKRAVARTY S, WANG Xiaolong, et al. On-chip methane sensing by near-IR absorption signatures in a photonic crystal slot waveguide[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 984-986.
- [23] ZHANG E J, MARTIN Y, ORCUTT J S, et al. Monolithically integrated silicon photonic chip sensor for near-infrared trace-gas spectroscopy[C]. *SPIE*, 2019, 11010: 110100B.

- [24] CHEN C, MOHR D A, CHOI H, et al. Waveguide-integrated compact plasmonic resonators for on-chip mid-infrared laser spectroscopy[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7601-7608.
- [25] MOHR D A, YOO D, CHEN C, et al. Waveguide integrated mid-infrared plasmonics with high-efficiency coupling for ultracompact surface-enhanced infrared absorption spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23540-23549.
- [26] CHEN C, OH S, LI M. Coupled-mode theory for plasmonic resonators integrated with silicon waveguides towards mid-infrared spectroscopic sensing[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2020-2036.
- [27] VASILIEV A, MALIK A, MUNEEB M, et al. On-chip mid-infrared photothermal spectroscopy using suspended silicon-on-insulator microring resonators[J]. *ACS Sensors*, 2016, 1(11): 1301-1307.
- [28] BHATTACHARJEE R, KEJALAKSHMY N T, RAHMAN B M A. Design and optimization of an Al doped ZnO in Si-slot for gas sensing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 6802910.
- [29] KUTILIKE B, KARI N, ZHANG Yuan, et al. Tetrahydroxyphenyl porphyrin membrane: a high-sensitivity optical waveguide gas sensor for NO₂ detection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(5): 055105.
- [30] GUTIERREZ-ARROYO A, BAUDET E, BODIOU L, et al. Theoretical study of an evanescent optical integrated sensor for multipurpose detection of gases and liquids in the Mid-Infrared[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 242: 842-848.
- [31] LIANG Yuxin, LIU Qi, WU Zhenlin, et al. Cascaded-microrings biosensors fabricated on a polymer platform [J]. *Sensors*, 2019, 19(1): 181.
- [32] PI Mingquan, ZHENG Chuantao, BI Ran, et al. Design of a mid-infrared suspended chalcogenide/silica-on-silicon slot-waveguide spectroscopic gas sensor with enhanced light-gas interaction effect [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 297: 126732.
- [33] ROBINSON J T, PRESTON K, PAINTER O, et al. First-principle derivation of gain in high-index-contrast waveguides[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16659-16669.
- [34] PI Mingquan, ZHENG Chuantao, JI Jialin, et al. Surface-enhanced infrared absorption spectroscopic chalcogenide waveguide sensor using a silver island film[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(27): 32555-32563.
- [35] YOO K M, MIDKIFF J, ROSTAMIAN A, et al. InGaAs membrane waveguide: a promising platform for monolithic integrated mid-infrared optical gas sensor[J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(3): 861-869.
- [36] GERVAIS A, JEAN P, SHI Wei, et al. Design of slow-light subwavelength grating waveguides for enhanced on-chip methane sensing by absorption spectroscopy[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(3): 5200308.
- [37] PI Mingquan, ZHENG Chuantao, PENG Zihang, et al. Theoretical study of microcavity-enhanced absorption spectroscopy for mid-infrared methane detection using a chalcogenide/silica-on-fluoride horizontal slot-waveguide racetrack resonator[J]. *Optics Express*, 2020, 28(15): 21432-21446.
- [38] SMITH C J, SHANKAR R, LADERER M, et al. Sensing nitrous oxide with QCL-coupled silicon-on-sapphire ring resonators[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5491-5499.
- [39] CHEN Yu, LIN Hongtao, HU Juejun, et al. Heterogeneously integrated silicon photonics for the mid-infrared and spectroscopic sensing[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(7): 6955-6961.
- [40] GUTIERREZ-ARROYO A, BAUDET E, BODIOU L, et al. Optical characterization at 7.7 μm of an integrated platform based on chalcogenide waveguides for sensing applications in the mid-infrared [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23109-23117.
- [41] KUMARI B, BARH A, VARSHNEY R K, et al. Silicon-on-nitride slot waveguide: a promising platform as mid-IR trace gas sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 236: 759-764.
- [42] SHANKAR R, BULU I, LONCAR M. Integrated high-quality factor silicon-on-sapphire ring resonators for the mid-infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(5): 051108.
- [43] HUANG Yuewang, KALYONCU S K, ZHAO Qiancheng, et al. Silicon-on-sapphire waveguides design for mid-IR evanescent field absorption gas sensors[J]. *Optics Communications*, 2014, 313: 186-194.
- [44] SINGH N, CASAS-BEDOYA A, HUDSON D D, et al. Mid-IR absorption sensing of heavy water using a silicon-on-sapphire waveguide[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5776-5779.
- [45] MA Pan, CHOI D, YU Yi, et al. High Q factor chalcogenide ring resonators for cavity-enhanced MIR spectroscopic sensing[J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19969-19979.
- [46] CHARRIER J, BRANDILY M, LHERMITE H, et al. Evanescent wave optical micro-sensor based on chalcogenide glass[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173: 468-476.
- [47] HAN Z, LIN P, SINGH V, et al. On-chip mid-infrared gas detection using chalcogenide glass waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(14): 141106.
- [48] SINGH R, SU P, KIMERLING L, et al. Towards on-chip mid infrared photonic aerosol spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(23): 231107.

- [49] DU Qingyang, LUO Zhengqian, ZHONG Huikai, et al. Chip-scale broadband spectroscopic chemical sensing using an integrated supercontinuum source in a chalcogenide glass waveguide[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(6): 506-510.
- [50] SU P, HAN Z, KITA D, et al. Monolithic on-chip mid-IR methane gas sensor with waveguide-integrated detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(5): 051103.
- [51] RYCKEBOER E, BOCKSTAELE R, VANSLEMBROUCK M, et al. Glucose sensing by waveguide-based absorption spectroscopy on a silicon chip[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(5): 1636-1648.
- [52] TOMBEZ L, ZHANG E J, ORCUTT J S, et al. Methane absorption spectroscopy on a silicon photonic chip[J]. *Optica*, 2017, 4(11): 1322-1325.
- [53] KATIYI A, KARABCHEVSKY A. Si nanostrip optical waveguide for on-chip broadband molecular overtone spectroscopy in near-infrared[J]. *ACS Sensors*, 2018, 3(3): 618-623.
- [54] KITA D M, MICHON J, HU J J. A packaged, fiber-coupled waveguide-enhanced Raman spectroscopic sensor[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14963-14972.
- [55] NITKOWSKI A, BAEUMNER A, LIPSON M. On-chip spectrophotometry for bioanalysis using microring resonators[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(2): 271-277.
- [56] SINGH R, MA D H, KIMERLING L, et al. Chemical characterization of aerosol particles using on-chip photonic cavity enhanced spectroscopy[J]. *ACS Sensors*, 2019, 4(3): 571-577.
- [57] KITA D M, MICHON J, JOHNSON S G, et al. Are slot and sub-wavelength grating waveguides better than strip waveguides for sensing?[J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1046-1054.
- [58] LIN P T, KWOK S W, LIN H G, et al. Mid-infrared spectrometer using opto-nanofluidic slot-waveguide for label-free on-chip chemical sensing[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 231-238.
- [59] LIN P T, LIN H G, HAN Zhaohong, et al. Label-free glucose sensing using chip-scale mid-infrared integrated photonics[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(11): 1755-1759.
- [60] LIU Qiankun, RAMIREZ J M, VAKARIN V, et al. Mid-infrared sensing between 5.2 and 6.6 μm wavelengths using Ge-rich SiGe waveguides [Invited][J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(5): 1305-1312.
- [61] QIAO Yingying, TAO Jifang, CHEN C, et al. A miniature on-chip methane sensor based on an ultra-low loss waveguide and a micro-ring resonator filter[J]. *Micromachines*, 2017, 8(5): 160.
- [62] BUTT M A, DEGTYAREV S A, KHONINA S N, et al. An evanescent field absorption gas sensor at mid-IR 3.39 μm wavelength[J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(18): 1892-1897.
- [63] BUTT M A, KHONINA S N, KAZANSKIY N L. Enhancement of evanescent field ratio in a silicon strip waveguide by incorporating a thin metal film[J]. *Laser Physics*, 2019, 29(7): 076202.
- [64] XIN Yu, PANDRAUD G, ZHANG Yongmeng, et al. Single-mode tapered vertical su-8 waveguide fabricated by e-beam lithography for analyte sensing[J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3383.
- [65] HUANG Tianye, XU Guizhen, PAN Jianxing, et al. Theoretical study of bicharacteristic waveguide for fundamental-mode phase-matched SHG from MIR to NIR[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15236-15250.
- [66] KOOMPAI N, LIMSUWAN P, LE R X, et al. Analysis of Si_3N_4 waveguides for on-chip gas sensing by optical absorption within the mid-infrared region between 2.7 and 3.4 μm [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102957.
- [67] ZEGADI R, LORRAIN N, BODIOU L, et al. Enhanced mid-infrared gas absorption spectroscopic detection using chalcogenide or porous germanium waveguides[J]. *Journal of Optics*, 2021, 23(3): 035102.
- [68] DELL'OLIO F, PASSARO V M N. Optical sensing by optimized silicon slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4977-4993.
- [69] ELSAYED M Y, ISMAIL Y, SWILLAM M A. Semiconductor plasmonic gas sensor using on-chip infrared spectroscopy[J]. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, 2018, 123(1): 113.
- [70] BUTT M A, KHONINA S N, KAZANSKIY N L. Silicon on silicon dioxide slot waveguide evanescent field gas absorption sensor[J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(2): 174-178.
- [71] KUMARI B, VARSHNEY R K, PAL B P. Design of chip scale silicon rib slot waveguide for sub-ppm detection of N_2O gas at mid-IR band[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 3409-3416.
- [72] QIAO Yingying, TAO Jifang, QIU Jifang, et al. Sensitive and ultrasmall sample volume gas sensor based on a sealed slot waveguide[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(17): 4708-4713.
- [73] WANG Yuefeng, CHEN Weiwei, WANG Pengjun, et al. Ultra-high-power-confinement-factor integrated mid-infrared gas sensor based on the suspended slot chalcogenide glass waveguide[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 347: 130466.
- [74] KOOMPAI N, CHAISAKUL P, LIMSUWAN P, et al. Design and simulation investigation of Si_3N_4 photonics circuits for wideband on-chip optical gas sensing around 2 μm optical wavelength[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2513.
- [75] CHANDRA V, RANJAN R. Performance analysis of different slot waveguide structures for evanescent field based gas sensor applications[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(8): 457.
- [76] ZHANG Yanan, ZHAO Yong, WANG Qi. Optimizing the slow light properties of slotted photonic crystal waveguide and

- its application in a high-sensitivity gas sensing system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105109.
- [77] JANNESARI R, RANACHER C, CONSANI C, et al. Sensitivity optimization of a photonic crystal ring resonator for gas sensing applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 264: 347-351.
- [78] FLUECKIGER J, SCHMIDT S, DONZELLA V, et al. Sub-wavelength grating for enhanced ring resonator biosensor[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15672-15686.
- [79] XU Guizhen, WANG Jin, JI Qizheng, et al. Design and analysis of slow-light Bloch slot waveguides for on-chip gas sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(2): 257-263.
- [80] STERN L, DESIATOV B, GOYKHMANN I, et al. Nanoscale light-matter interactions in atomic cladding waveguides[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 1548.
- [81] RANACHER C, CONSANI C, VOLLERT N, et al. Characterization of evanescent field gas sensor structures based on silicon photonics[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(5): 2700614.
- [82] RANACHER C, CONSANI C, TORTSCHANOFF A, et al. Mid-infrared absorption gas sensing using a silicon strip waveguide[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 277: 117-123.
- [83] CONSANI C, RANACHER C, TORTSCHANOFF A, et al. Mid-infrared photonic gas sensing using a silicon waveguide and an integrated emitter[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 274: 60-65.
- [84] RANACHER C, CONSANI C, HEDENIG U, et al. A photonic silicon waveguide gas sensor using evanescent-wave absorption[C]. Orlando, FL, USA: IEEE SENSORS, 2016: 1-3.
- [85] AL H D, KARANTH Y, ZHOU Junchao, et al. Surface functionalization utilizing mesoporous silica nanoparticles for enhanced evanescent-field mid-infrared waveguide Gas sensing[J]. *Coatings*, 2021, 11(2): 118.
- [86] PI Mingquan, ZHENG Chuantao, ZHAO Huan, et al. Mid-infrared ChG-on-MgF₂ waveguide gas sensor based on wavelength modulation spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4797-4800.
- [87] PI Mingquan, HUANG Yijun, ZHAO Huan, et al. Theoretical and experimental investigation of on-chip mid-infrared chalcogenide waveguide CH₄ sensor based on wavelength modulation spectroscopy [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 362: 131782.
- [88] OTTONELLO-BRIANO F, ERRANDO-HERRANZ C, RODJEGARD H, et al. Carbon dioxide absorption spectroscopy with a mid-infrared silicon photonic waveguide[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 109-112.
- [89] 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.
- [90] STIEVATER T H, PRUESSNER M W, PARK D, et al. Trace gas absorption spectroscopy using functionalized microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 969-972.
- [91] CHAKRAVARTY S, MIDKIFF J, YOO K, et al. Monolithic integration of quantum cascade laser, quantum cascade detector, and subwavelength waveguides for mid-infrared integrated gas sensing [C]. *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVI*, 2019: 109261V.
- [92] LIU Weixin, MA Yiming, CHANG Yuhua, et al. Suspended silicon waveguide platform with subwavelength grating metamaterial cladding for long-wave infrared sensing applications[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(7): 1861-1870.
- [93] ROSTAMIAN A, MADADI-KANDJANI E, DALIR H, et al. Towards lab-on-chip ultrasensitive ethanol detection using photonic crystal waveguide operating in the mid-infrared[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(6): 1675-1682.
- [94] LIU Weixin, MA Yiming, LIU Xinmiao, et al. Larger-than-unity external optical field confinement enabled by metamaterial-assisted comb waveguide for ultrasensitive long-wave infrared gas spectroscopy[J]. *Nano Letters*, 2022, 22(15): 6112-6120.

Progress of On-chip Infrared Gas Sensing Technique (Invited)

PI Mingquan^{1,2}, ZHENG Chuantao^{1,2}, LIANG Lei³, SONG Fang^{1,2}, WANG Yiding^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun 130012, China)

(3 State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: On-chip gas sensor based on infrared absorption spectroscopy has the advantages of portability, low power consumption and no need for optical path calibration. Therefore the optical gas sensor has

gradually evolved from a large-size discrete system to an on-chip integrated system in recent years. The on-chip gas sensor detects gas based on waveguide evanescent field, and the interaction effect between light and gas is determined by the External Confinement Factor (ECF). However, the ECF of the waveguide is generally smaller than 1. Waveguide length is small and has a non-negligible loss. Compared with the discrete gas sensor system, these disadvantages undoubtedly reduce the sensitivity of the on-chip gas sensor. The following points need to be considered when fabricating an on-chip gas sensor: 1) Appropriate core and cladding materials should be selected to reduce absorption loss at the operating wavelength; 2) Choose and optimize waveguide structure to improve ECF; 3) Consider the feasibility and cost of the fabrication process; 4) Choose appropriate waveguide length according to waveguide loss to improve signal-to-noise ratio; 5) Choose appropriate spectroscopy sensing technique to increase sensitivity.

In this review, the on-chip gas sensing method is reviewed, including Direct Absorption Spectroscopy (DAS), Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) and Micro-Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy (MCEAS). DAS technique detects the variation of light intensity, which is easily affected by noise. WMS processes signal in high frequency region and can suppress noise. MCEAS can achieve a large optical path length by an optical cavity with a compact size.

Waveguide material and structure are reviewed. Gas has a larger absorption coefficient in the mid-infrared than that in the near-infrared. So transparent material is needed to decrease absorption loss. The commonly used waveguide material and platform for gas sensing are summarized. In addition, the cross-section structures of conventional waveguides are summarized, including rectangular waveguide, rib waveguide, slot waveguide, pedestal waveguide and suspended waveguide. The non-suspended waveguide has low ECF than the free-space with $ECF = 1$. The suspended waveguide makes full use of the area at the bottom of the core layer, so the ECF of the suspended waveguide can be > 1 . But the difficulty of the fabrication process also increases. Photonic crystal waveguide has slow light effect, which can effectively improve ECF. But the loss of the photonic crystal waveguide is larger and limits the size of the interaction length.

Theoretical design progress and experimental progress of on-chip gas sensors are summarized. In terms of waveguide sensor structure, sensing waveguide gradually evolved from non-suspended structure to a suspended structure to improve ECF. In the aspect of on-chip integration, on-chip sensors are gradually developing from non-integration (only waveguide) to semi-integration (integrated laser or detector) and full integration. In addition, other physical effects are also combined, such as the adsorption effect and surface-enhanced infrared absorption effect.

Finally, the development direction of the on-chip gas sensor has been prospected. First, the biggest advantage of on-chip gas sensing is miniaturization, but the monolithic integration technology of light source, sensing waveguide and detector still needs to be developed, which limits the application of the on-chip gas sensor. In addition, the material and fabrication process of the sensing waveguide are also required to be compatible with the light source and detector. Second, new infrared transparent material can be used to fabricate optical waveguides to reduce the absorption loss of the material. Third, the waveguide length of an on-chip gas sensor also limits sensitivity, and other physical effects can enhance the sensitivity. Fourth, the structure of the optical waveguide directly affects the ECF, so it is necessary to reduce the fabrication difficulty as much as possible on the premise of monolithic integration and large ECF to achieve mass production. Fifth, advanced sensing technology can reduce the noise level of the sensor and improve sensitivity.

Key words: Infrared absorption spectroscopy; Gas sensor; Optical waveguide sensor; Integrated optics; Tunable diode laser absorption spectroscopy

OCIS Codes: 070.4790; 130.6010; 230.7370; 300.6340

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 62175087, 62235016, 61960206004), Science and Technology Development Program of Jilin Province, China (No. 20200401059GX), Science and Technology Research Program of Department of Education, Jilin Province, China (No. JJKH20211088KJ), Key Research and Development Program of Changchun City, China (No. 21ZGN24), Program for JLU Science and Technology Innovative Research Team (Nos. JLUSTR, 2021TD-39)