

芯片级硅基光谱仪研究进展

王伟平^{1*}, 金里²

1. 中国电子科技集团公司信息科学研究院, 北京 100086
2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088

摘要 光谱仪作为光谱分析不可或缺的工具, 在生物传感、食药检测、医疗、环境监测等领域有着广泛的用途。传统的光谱仪体积大、功耗高、价格昂贵和难以二次开发, 应用范围受到了极大地限制。随着微型加工工艺的发展, 微型化的光谱仪逐渐出现。相较于传统的大型光谱仪, 微型光谱仪不仅成本低、体积小、功耗低, 而且便于二次开发, 扩展了光谱仪的应用范围。但是, 微型光谱仪通常是基于分立的光学器件, 通过将光学器件的小型化而实现的, 集成度和灵活性不高。随着对便携性的要求越来越高, 光谱仪的进一步小型化和集成化已成趋势, 出现了芯片级的光谱仪。芯片级光谱仪具有明显的尺寸、重量和功耗的优势, 将对光谱仪在无人设备、智能平台等新兴领域中的应用产生重要影响。在芯片级光谱仪的实现过程中, 硅基光子技术因其成熟的加工工艺和良好的集成性能, 为光谱仪的芯片化提供了一种集成化、低成本的解决方案, 国内外研究人员针对芯片级硅基光谱仪展开了大量的研究, 取得了丰富的成果。文章分析了硅基片上光谱仪的工作原理, 将目前的芯片级硅基光谱仪分成了色散型和傅里叶变换型两大类进行介绍, 分析了这两类光谱仪的主要特点和典型实现方式。文中给出了刻蚀衍射光栅、波导阵列光栅、多模波导等色散型硅基片上光谱仪和空间外差、驻波式、热调、数字以及基于微机电系统的傅里叶变换型硅基片上光谱仪的最新研究进展, 分析了各种光谱仪的性能特点和适用范围。在此基础上, 展示了本组的最新研究成果, 通过创造性地将基于马赫曾德尔干涉仪的空间外差傅里叶变换型光谱仪结构和波导阵列光栅的色散型光谱仪结构相结合, 可同时实现较大的光谱范围和较高的光谱分辨率, 为硅基片上光谱仪的应用打下了较好的基础。最后, 论述了硅基片上光谱仪的发展趋势与应用前景, 为芯片级硅基光谱仪的研究提供了参考。

关键词 硅基; 片上光谱仪; 色散; 傅里叶变换

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** R **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0333-10

引言

作为光谱分析不可或缺的工具, 光谱仪被应用在生物传感、医学分析、气体传感、环境分析、石油勘探及食品质量检测等各方面^[1-4]。传统的高性能光谱仪通常是由分立的光学元件和机械部件构成, 体积庞大、结构复杂、造价昂贵, 极大地限制了其应用范围。随着对光谱仪便携性和稳定性要求越来越高, 其小型化和集成化已成趋势。相较于传统的大型光谱仪, 小型化的光谱仪成本低、体积小、功耗低, 便于现场在线监测, 极大地扩展了应用范围。现阶段存在着各种不同的小型化光谱仪, 主要是通过利用新型加工技术将分光器件小型化来实现的。相较于其他小型化的光谱仪, 片上光谱仪将光谱仪的尺寸缩小至芯片级的尺寸, 有着更明显的尺

寸、重量和功耗的优势, 可被集成应用在各种微小的工作平台上, 引起了国内外研究机构的广泛关注^[5-14]。

在各种芯片化的解决方案中, 硅基光子技术为光谱仪的芯片化提供了一种有效的实现方式。首先, 得益于成熟的硅光工艺, 可以以较低的加工成本制造出高密度、高成品率的光子器件^[15]。其次, 通过光子集成技术, 将光谱仪和光电探测器集成, 加上异构/异质集成的光源, 可在单个芯片上集成所需要全部光学元件而构成一个功能完整光谱仪^[16-18]。最后, 硅光代工的 MPW 服务也为高性能的器件提供了低成本的路径^[8,19]。现有的硅基片上光谱仪主要分为基于刻蚀衍射光栅、阵列波导光栅等的色散型光谱仪和傅里叶变换型光谱仪等。色散型光谱仪具有较高的光谱分辨率, 而傅里叶变换型光谱仪则可实现较大的光谱范围和较高的信噪比。本文综述了几种主要的硅基片上光谱仪的研究进展, 分析了各自

收稿日期: 2019-01-22, 修订日期: 2019-04-25

基金项目: 装备预研项目(6141B08130302)资助

作者简介: 王伟平, 1988年生, 中国电子科技集团公司信息科学研究院工程师 e-mail: wangweiping2016@163.com * 通讯联系人

的性能特点,在此基础上提出了将两种类型的光谱仪结构合成新型光谱仪结构,以同时实现宽光谱探测范围和较高的分辨率。最后,展望了芯片级光谱仪的未来发展趋势与应用前景。

1 硅基片上光谱仪光谱分光原理

现有的硅基片上光谱仪实现途径主要分为两大类,一类是色散型片上光谱仪,另一类是基于傅里叶变换(Fourier transform, FT)的片上光谱仪。色散型硅基片上光谱仪主要是通过通过对不同波长的光进行空间或时间上的分离,来读出光谱。具体的实现方式是利用硅基光栅、波导的色散等对不同波长的光进行分光,直接在输出端得到多个光谱通道输出,每个通道都需要一个独立的探测器,因此一般需要利用阵列探测器进行探测,或者利用一个探测器,移动到对应输出端口进行探测。其中,硅基刻蚀衍射光栅(echelle diffraction grating, EDG)和硅基阵列波导光栅(arrayed-waveguide grating, AWG)是两种最典型的色散型平面集成光学器件。两种器件在光通信领域都已有相对成熟的研究,研究基础较好,同时在分辨率、工作带宽、芯片的尺寸和对制造误差的容忍度等方面性能较好。将这两种器件用作光谱仪中的分光元件时,需要根据使用的波长范围和性能指标,以及系统的要求重新进行匹配性设计。然而,由于此种类型光谱仪的分辨率和光栅个数或光谱通道数成正比,若要实现高分辨率,器件的尺寸势必要增加,会带来较大的相位误差,信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)降低,进而降低动态范围,因此利用硅基 EDG 或 AWG 实现的集成式光谱仪很难在实现高的光谱分辨率的同时实现大的动态范围。为了克服此限制,提出了基于散斑测量的硅基片上光谱仪结构,以扩展光谱仪的动态探测范围^[7]。

傅里叶变换型硅基片上光谱仪则是对不同波长的光进行波分复用,探测器探测完成后需要通过傅里叶逆变换完成光谱重构才能得到光谱信号。相较于色散型光谱仪,傅里叶变换型的光谱仪可以克服 SNR 和光谱分辨率之间的矛盾,这是因为此种类型的光谱仪具有多路测量的优势(fellgett's advantage, 采用多路测量来获得信噪比的改善),同时由于所有波长的光谱信息可以同时被测量,因此在光通量方面也具有较大的优势。传统的傅里叶光谱仪是通过一条干涉光路中反射镜的移动来产生可变的光程差,而针对硅基波导器件,主要通过以下三种方式来实现光路中光程差的改变:一是无可移动部件的集成式傅里叶变换型片上光谱仪,主要是通过驻波和空间外差的干涉仪结构设计来实现的^[20-21];二是通过热光、电光调制来改变干涉仪中光程差^[14, 22];三是直接借鉴传统的光谱仪结构,利用微机电器件(micro-electro-mechanical system, MEMS)直接移动干涉光路中的元件来实现光程差的改变^[12]。本文主要介绍和分析上述几种类型的硅基片上光谱仪的研究进展,并对其应用和发展趋势进行总结和展望。

2 色散型硅基片上光谱仪

2.1 刻蚀衍射光栅型硅基片上光谱仪

EDG 通常采用凹面闪耀光栅和罗兰圆的结构设计,如图 1 所示,输入波导和输出波导/探测器阵列分别位于罗兰圆上,且延长线相交于切点 P,凹面光栅位于大圆上(与罗兰圆相切于 P,且半径为罗兰圆的 2 倍),罗兰圆的作用是实现聚焦的功能。多色光通过输入波导入射,被光栅反射后,发生衍射,不同波长的光经罗兰圆结构聚焦,分别进入不同的输出波导/探测器中,从而实现不同位置处单色光的输出。

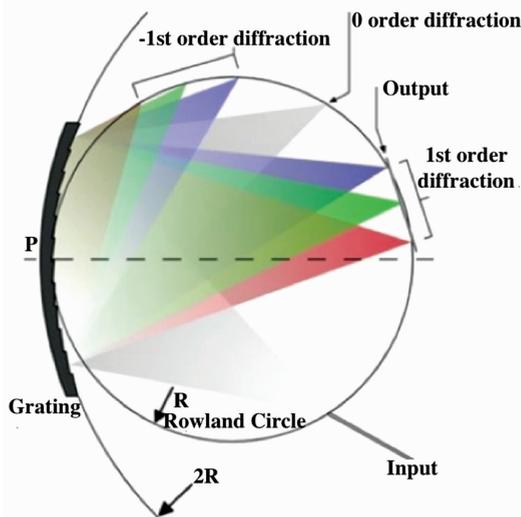


图 1 EDG 的原理结构图

Fig. 1 The principle diagram of EDG

基于 EDG 分光器件可开发出集成式的片上光谱仪系统^[23]。采用 InGaAs 探测器或 III-V 光电探测器,将其和 EDG 键合来实现芯片级光谱仪。但无论是采用 III-V 光电探测器还是 InGaAs 探测器,由于材料体系所限,集成和键合的过程均不是 CMOS 工艺兼容的,加工成本较高。选用 SiON 波导,可以实现 CMOS 兼容的工艺,从而降低加工成本。浙江大学的 Ma 等^[23]提出基于 EDG 的 CMOS 可兼容芯片光谱仪的结构。采用 SiON 作为波导的介质, SiO₂ 为波导的覆盖层,在 SOI 晶圆上制作硅探测器,探测器采用金属-半导体-金属的结构,如图 2 所示,信号光通过输入波导进入到平板波导区,入射至光栅面,被衍射后,根据波长被聚焦至特定位置的硅波导探测器上。探测器阵列和 SiON 平板波导对接耦合,将光信号转换为电信号,之后通过焊盘和读出电路连接。整个芯片的尺寸为 6 mm×9 mm,可实现 0.5 nm 光谱分辨率的近红外光谱探测,根据 SiON 的透过率,其探测范围可扩展至 2 000 nm。

基于 EDG 结构的硅基片上光谱仪具有面积小、齿面间距小且数量多、单边输入输出等优点,而且具有集成密度大、通道频谱精度高和易于封装等优势。但同时,由于 EDG 结构的加工关键是在平板波导边缘处刻蚀阶梯光栅,其相位差产生在平板波导内,由于工艺的限制,刻蚀侧壁不能保证

完全垂直, 会在光栅槽面反射后激发出高阶模, 从而产生较严重的串扰。因此应用中, 需要根据系统和性能要求, 进行综合考虑。

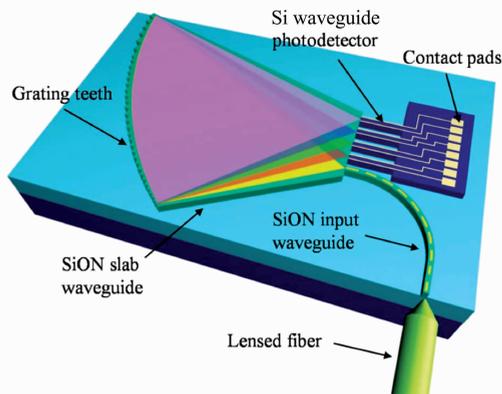


图 2 基于 EDG 的集成光谱仪结构图^[23]

Fig. 2 Schematic of the integrated spectrometer based on EDG^[23]

2.2 阵列波导光栅型硅基片上光谱仪

AWG 是由一个阵列波导和两个星形耦合器构成, 如图 3 所示。入射的多色光经输入波导耦合, 并经输入端的星形耦合器被分配至阵列波导中, 沿着波导传播并进入输出端的星形耦合器中。阵列波导中相邻波导的长度差值为 dL , dL 是中心波长 λ_c 的整数倍。在输出端的星形耦合器中, 光束发生干涉, 并被聚焦至特定位置。不同波长的光在阵列波导中会有不同的相位, 因此到达输出端的星形耦合器处相位不同, 导致光束聚焦至输出面的不同位置, 即实现了不同波长的光在输出波导的不同位置输出。

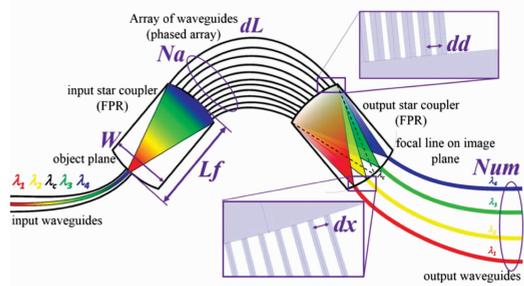


图 3 AWG 结构原理图

Fig. 3 Principle diagram of an AWG

AWG 的性能特征主要取决于所采用波导材料的光学特性, 通常有基于低折射率差材料和高折射率差材料的 AWG。基于低折射率差材料的 AWG, 如基于 SoS 波导 (silica-on-silicon) 的器件, 是利用 SiO_2 作为掩埋层, 中心和包层的折射率差值 Δn 约为 0.75%。此种类型的 AWG 有着耦合效率高和传输损耗低的优势。但是, 由于折射率差值较低, 导致波导的弯曲半径很大, 进而导致 AWG 的尺寸很大, 通常可达几个 cm^2 , 限制了器件的集成度^[24]。高折射率差值材料的 AWG, 如基于 SOI (silicon-on-insulator) 波导的器件, 折射率

差值 Δn 约为 58%。由于高的折射率差, 可使器件的尺寸缩小至亚微米的量级, 相较于基于 SoS 的 AWG, 基于 SOI 的 AWG 尺寸缩小了两个量级^[24]。但是, 此类 AWG 的主要问题是耦合损耗将增加, 同时对误差更为敏感, 导致制造过程中随机相位误差增加, 通道间的串扰随之增大, 将对加工工艺的精度提出更大的挑战。在设计中, 根据器件尺寸的限制, 选择合适的材料体系, 也可在高折射率差和低折射率差之间进行折中, 采用折射率差适中的 Si_3N_4 的材料来加工制作。

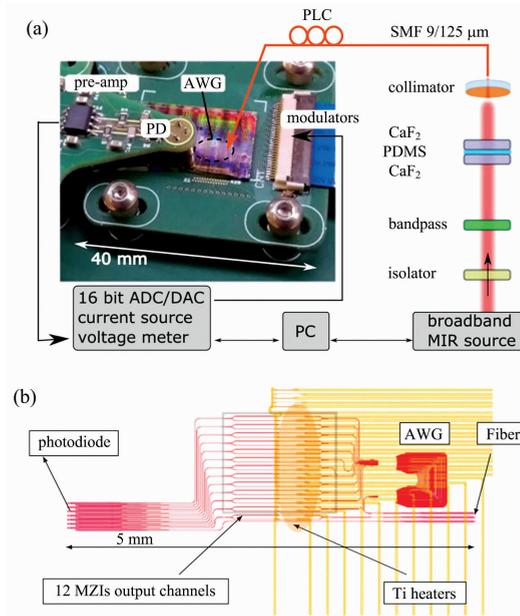


图 4 (a) 带有一个片外探测器的 SOI AWG 光谱仪结构图; (b) AWG 的设计版图^[27]

Fig. 4 (a) Schematic of the spectroscopy setup using a SOI AWG spectrometer with a single external detector; (b) Design layout of the AWG^[27]

基于 AWG 芯片可开发出集成式的光谱仪, Muneeb 和 Wang 等^[25-26] 提出将 III-V 族的硅基探测器和 AWG 芯片异构集成实现片上光谱仪。Anton Vasiliev 等^[27] 则提出, 将片外探测器和 AWG 芯片封装的方案要优于片上集成的方案, 针对 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 的中红外波段的光谱应用, 给出了将一个标准的 TO 封装的 InGaAs PIN 探测器与 AWG 封装的光谱仪结构图, 如图 4(a) 所示。其中 AWG 为 12 通道, 通道间隔为 4 nm, 自由光谱范围为 56 nm。探测器被安装在 AWG 输出光栅上方, 可同时收集所有通道的光信号。如图 4(b) 所示, AWG 的每个输出通道连接 MZI (mach-zehnder interferometer) 的热光调制器, 可实现对 AWG 各路输出的单独控制。基于 AWG 结构的硅基片上光谱仪具有较好的波长特性, 重复性和稳定性较高, 集成度较高。但是, 在采用此种结构的过程中, 需要考虑损耗和通道间串扰, 进行容差设计。

2.3 硅基多模波导片上光谱仪

硅基多模波导片上光谱仪主要是基于散斑测量的原理^[6,28-29], 以实现较高的光子效率和高的灵敏度。在此类型

的光谱仪中,由于探测到的光谱动态范围等于独立散斑的数目和光谱仪分辨率的乘积,而散斑通常需要利用阵列探测器进行探测,因此若要提高器件的探测范围,则探测器的数量也相应地需要增加,进而使得器件尺寸大大增加。为了克服此限制, Molly Piels 等^[30]提出一种利用片上模式发射器来改变输入发射条件的光谱仪结构,在这种结构中,动态探测范围和通道数的平方成正比。如图 5(a)所示,光谱仪由硅基多模波导、模式发射器和单模输入输出耦合器构成。不同波长的输入光经单模输入模式发射器(设置发射条件)后,再经多模波导传播后产生不同的输出散斑模式。如图 5(f)所示,

多模波导的输出对接耦合至输出端,输出端用光栅结构,也可用光电探测器来替代。通过将待测输出端光的散斑模式和之前测量得到的一系列校准数据进行比对来得到输入光谱分布。由于散斑也是发射条件的函数,因此在测量过程中要确保发射条件和用于校准器件的发射条件的一致性。在进行光谱重建时,采用积极约束和 Tikhonov 正则化结合的重建方法,以确保误差的最小化^[30]。基于多模波导的硅基片上光谱仪可以以较小的尺寸实现大的光谱探测范围,但同时由于校正过程较为复杂,对算法的要求较高。

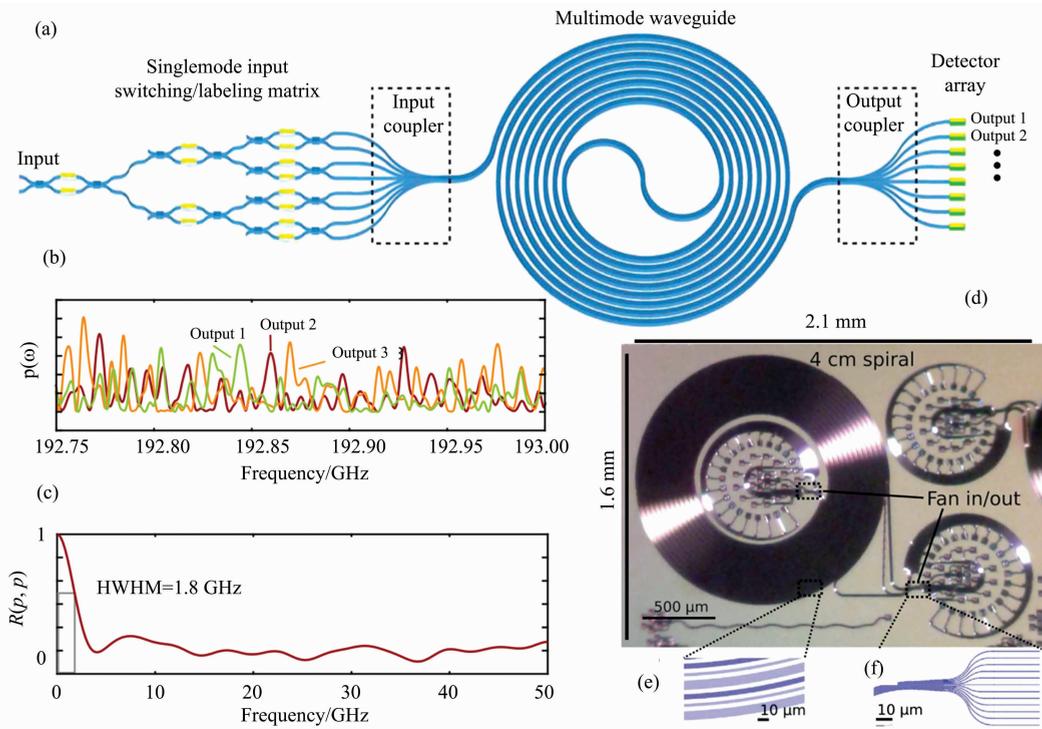


图 5 多模波导光谱仪设计及响应^[30]

(a): 包含转换矩阵和集成光电探测器的原理图; (b): 3 个不同位置处测量得到的散斑功率分布 $p(x; \omega)$; (c): $p(\omega)$ 的平均自协方差; (d): 芯片的显微镜图; (e): 多模波导的掩膜视图; 图中颜色较浅的部分不属于测试部分; (f): 扇入/扇出的掩膜视图; 多模输入/输出在左侧, 通过锥形波导输出, 对接耦合至 12 个单模波导

Fig. 5 Spectrometer design and response^[30]

(a): Schematic including input switch matrix and integrated photodiodes; (b): Measured speckle pattern $p(x; \omega)$ at three different positions; (c): Mean autocovariance of $p(\omega)$; (d): Micrograph of fabricated chip; (e): Mask view of the bus waveguide; Waveguides that are not part of the device under test are lighter in color; (f): Mask view of the fan in/out; The multimode input/output enters at left, tapers out, and is butt-coupled to 12 single mode waveguides

综上所述的三种色散型硅基光谱仪中,基于多模波导的硅基片上光谱仪可以实现较高的分辨率,但同时光谱探测范围较小,而且技术成熟度较低,目前还处于研究阶段。基于 EDG 或 AWG 的硅基片上光谱仪的设计和加工都相对成熟,可实现较高的光谱分辨率和较大的光谱探测范围。相较于 AWG 结构来讲,EDG 的结构设计相对简单,集成密度高,但串扰严重,对工艺的要求较高。AWG 结构是目前较为常选的硅基片上光谱仪结构。国内相关研究机构,针对微型色散光谱仪也开展了相关研究,如重庆大学^[31]、浙江大学^[32]、西北工业大学乔大勇团队^[33-34]等在微型光谱仪的关键技术

领域取得一定进展,但主要是针对微型化光谱的研究,光谱仪结构中仍包含镜片、狭缝等传统光机元件。对芯片级的光谱仪系统研究较少,单纯是将 AWG 或 EDG 结构作为通信领域应用的波分复用元件开展了相关研究^[35],并未从光谱仪角度出发对整个系统开展相关研究。

3 傅里叶变换型硅基片上光谱仪

3.1 空间外差式硅基片上光谱仪

空间外差式光谱仪结构 (spatial heterodyne spectrome-

ter, SHS)属于静态的傅里叶变换型光谱仪,较为常见的是采用波导型马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)阵列来实现。在基于 MZI 阵列的平面波导 SHS 中,通过构建不平衡的干涉仪结构(MZI 的两臂长度不一致)来实现相位差,越不平衡的 MZI 结构,对应的分辨率越高。Mirośnań Florjacyk 等^[36]提出多孔径输入型 SHS,如图 6 所示,器件由多个波导形成多孔径输入,每个输入对应一个独立的 MZI。输入信号沿着阵列 MZI 传播,并发生干涉,在输出端可以得到功率分布,利用匹配的光电探测器来测量输出功率,通过对得到的光功率分布进行傅里叶变换,可以得到输入光的光谱信息。相较于单孔径输入,多孔径器件的光通量和波导数目成正比,在测量来自空间扩展光源的信号时,具有明显的优势。由于器件的加工等会引入相位误差,可以通过算法的校正来消除这些误差,例如在恢复算法中利用查表法^[36]。

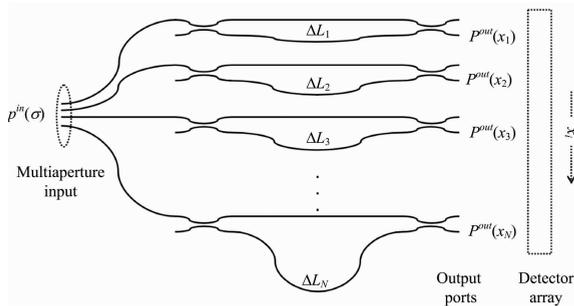


图 6 由阵列马赫曾德尔干涉仪构成的波导光谱仪原理图
Fig. 6 Schematic of the waveguide spectrometer formed by arrayed Mach-Zehnder interferometers

相较于 AWG 和 EDG,阵列 MZI 结构还有一个重要的优势,即制作工艺的鲁棒性。这是因为相位和幅度误差可以很容易被测量,并通过校正算法进行修正,而不需要通过加工来对波导的结构尺寸进行改变。例如,切趾法校正也可以被应用在校正算法中来代替专用的切趾光学元件。

3.2 驻波傅里叶变换型硅基片上光谱仪

针对某些对版图面积限制较小的应用,SHS 可以不损失信噪比,在较窄的光谱带宽中实现高的分辨率。然而,针对一个给定的光谱带宽,SHS 方案中若要提高分辨率,需要更多的 MZI,器件的尺寸迅速增加。驻波集成式傅里叶片上光谱仪(stationary wave integrated Fourier transform spectrometer, SWIFTS)可以在较小的尺寸上实现高分辨率。Nie 等^[37]提出一种新型的同向传播的 SWIFTS 结构,如图 7 所示。待测信号首先入射至 MMI(multimode interference)耦合器的输入端,之后被分到 2 个不同宽度的平行波导中,两波导中的光在传播过程中不会发生能量交换,不同宽度波导中光传播的相速度不同。虽然两个平行波导在空间上分开,但两波导中传播倏逝波的尾部有轻微重叠,因此会在两平行波导之间形成干涉图样。在干涉图像具有最好对比度的地方,放置一个具有合适周期的光栅用来将干涉图样向上衍射至探测系统。对采集到的光强随波导长度变化的信号进行傅里叶变换,可以得到输入光谱信息。采用 CMOS 兼容 Si_3N_4 工艺

加工平台来加工制作,器件的尺寸为 0.1 mm^2 ,可实现 6 nm 左右的分辨率和 100 nm 的带宽。

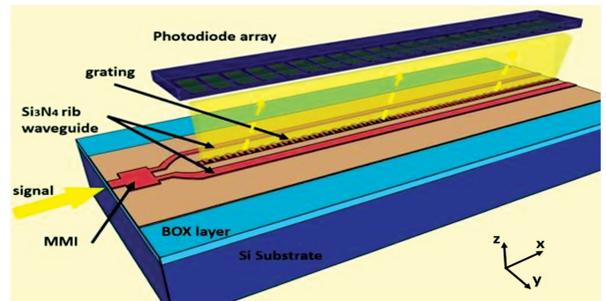


图 7 同向传播驻波 FTS 的概念图^[37]

Fig. 7 Conceptual drawing of the co-propagative stationary FTS^[37]

此类型的 SWIFTS 中,光谱分辨率和波导长度成反比,可以通过增加波导长度进一步改善分辨率。带宽主要受限于探测器的波长响应范围和波导中传输的波长范围。因此,只要是在波导的透明波段范围内,再集成对应响应波长的探测器,可针对不同的波长窗进行不同用途的设计。

3.3 热调傅里叶变换型硅基片上光谱仪

除了通过改变干涉仪两臂的物理长度来实现光程差的变化外,还可通过热光调相改变材料折射率的方法来实现光程差的变化。为了获得较高的光谱分辨率,需要折射率的变化率较高。Mario C. M. M. Souza 等^[22]提出了基于 SOI 平台的,带有集成微加热器的硅基傅里叶变换光谱仪(silicon photonics-based Fourier transform spectrometer, Si-FTS)结构,如图 8(a)所示。器件由一个标准的 MZI 结构集成金属微加热器构成,外部光耦合至芯片后,进入 MZI 的两臂,之后通过 Y 分支耦合器发生干涉并输出,被光电探测器探测,器件的总尺寸为 1 mm^2 。MZI 的每个臂由总长为 30.407 mm 的螺旋线构成[如图 8(d)所示],被独立驱动的镍铬微加热器覆盖,两臂之间绝热。最终,以每个加热器 2.5 W 的功耗,在 193.4 THz 周围以 0.38 THz 的分辨率恢复了一个 7 THz 宽的光源光谱。由于引入了热调,加热引起的光非线性、热膨胀和色散会给光谱重建引入误差,导致得到的光谱和实际光谱之间有误差。为了消除此种误差,需要在光谱信号处理算法上考虑这些影响并进行修正。Mario C. M. M. Souza 等^[22]提出在光谱重建算法中引入与频率和温度变化相关的等效折射率和臂长的变化函数,函数中各展开项的参数确定主要通过各影响因素的实验来进行标定和拟合,从实验结果中提取参数。同时,考虑通过标准光源光谱对非线性进行标定和校正。

考虑到现有硅光设计和制造的优势,基于热调的片上 Si-FTS 的性能提升潜力很大。首先,对于一个给定的器件,工作窗口将由波导光耦合/分束器决定。这些器件可在几百纳米的范围内提供较平坦的响应,同时拥有较低的损耗,这些都允许基于热调的 Si-FTS 可在较宽的带宽内工作。其次,利用低损耗的硅波导制造工艺,结合 CMOS 兼容硅器件热光效应引起的大折射率变化率,可实现较高的光谱分辨率。最后,通过适当的设计改变,可较大改善功率效率。例如,

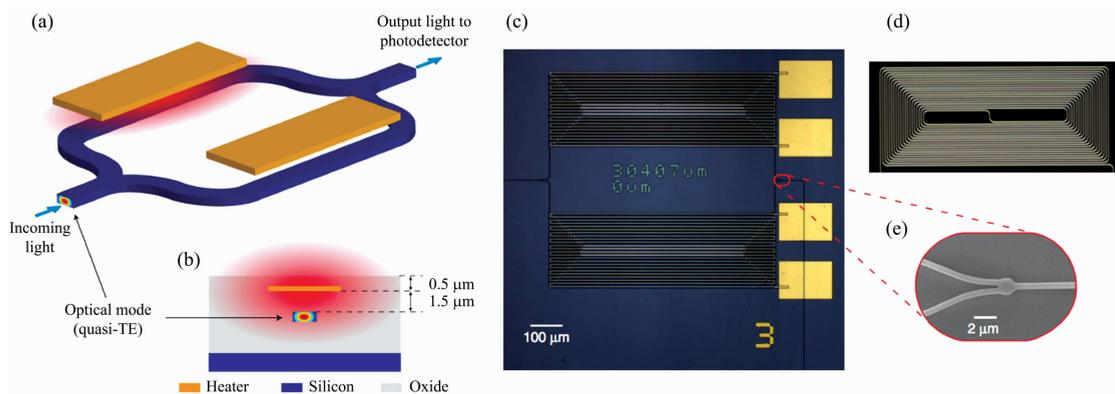


图 8 基于热调的片上 Fourier 变换光谱仪

(a): SOI 平台上的 MZI 与集成金属微加热器的原理图; (b): 器件的横截面图, 给出了条形硅波导的准 TE 模式和电流流过微加热器时的加热区域(光线为红色); (c): 实验器件的光学显微图, 总版图为 1 mm²; (d): 加热器下 MZI 臂的光学显微图; (e): 宽带功率分束/合束器的电子显微镜图

Fig. 8 On-chip Fourier transform spectrometer

(a): Schematic of a MZI with integrated metal micro heaters on silicon-on-insulator (SOI) platform; (b): Device cross-section illustrating the quasi-TE mode (energy density) of the strip silicon waveguide and the heated area (light red) when current flows through the micro heater; (c): Optical micrography of the experimental device with a total footprint of 1 mm²; (d): Dark field optical micrography of the MZI arm underneath the heater trails; (e): SEM image of the broadband power splitter/combiner

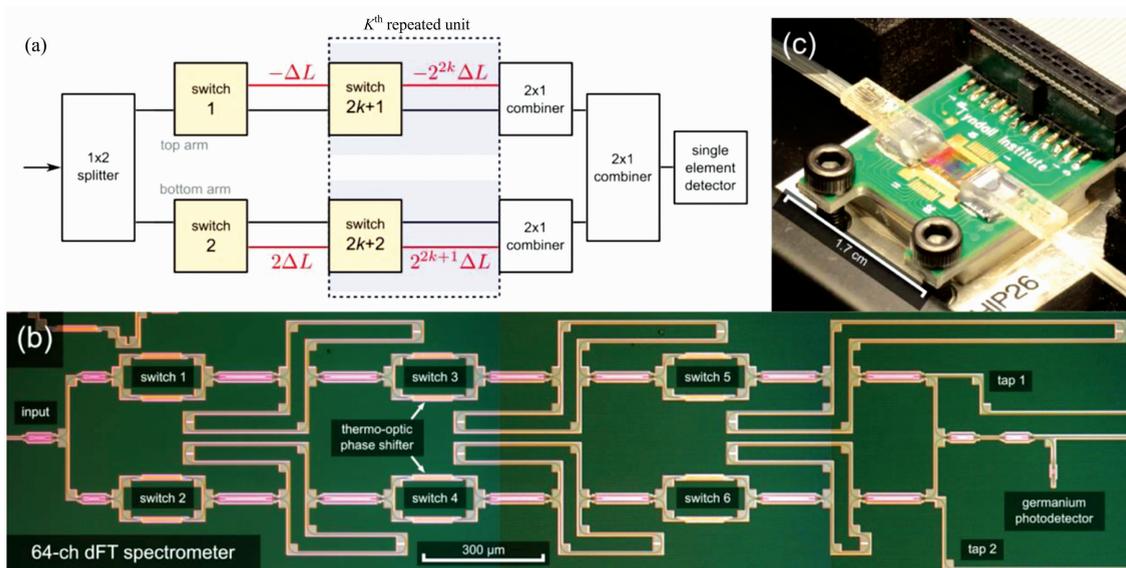


图 9 (a) 一个拥有 j 个开光的 dFT 光谱仪的结构框图, 共有 $j/2-1$ 个重复的台阶; (b) 前道硅制造工艺后的 64 通道 dFT 光谱仪的俯视显微图, 给出了干涉仪的排布, 热光开关和波导集成 Ge 探测器; (c) 全封装的, 即插即用光谱仪图, 具有标准的 FC/PC 光纤接口和控制及信号读出电缆^[38]

Fig. 9 (a) Block diagram illustrating the generic structure of a dFT spectrometer with j switches and $K=j/2-1$ repeated stages indexed by $k \in [1, K]$; (b) Top-view optical micrograph of the 64-channel dFT spectrometer after front-end-of-line silicon fabrication, showing the interferometer layout, the thermo-optic switches and waveguide-integrated germanium photodetector; (c) Photo of the fully-packaged, "plug-and-play" dFT spectrometer with standard FC/PC fiber interface and a ribbon cable for control and signal read-out^[38]

利用迈克尔逊干涉仪代替 MZI 结构来加倍光程, 同时引入热隔离结构增加热效率等。这些优势都使得基于热调的 Si-FTS 在成为稳定的通用型便携光谱仪方面具有较大的潜力。

3.4 数字傅里叶变换型硅片上光谱仪

通过对 MZI 阵列结构进行重新排布和设计, 可实现光

谱仪信噪比(SNR)和光谱通道扩展能力的提升。Derek M. Kita 等^[38]展示了一种变形的片上数字傅里叶变换光谱仪(digital Fourier transform spectrometer, dFTs), 它可以通过重组的 MZI 结构的时域调制实现高光谱分辨率。光谱仪主要是基于如图 9(a)所示重组的 MZI 结构。MZI 的每个臂由

$j/2(j$ 是偶整数) 个级联光开关和不同长度的波导连接在一起。当光在 MZI 的两臂中都沿参考光路[如图 9(a) 中黑色标记波导]传播时, 此时 MZI 是平衡结构, 两臂之间的光程差为 0。而图 9(a) 中红色标记的波导路径和参考路径不同, 相邻波导长度相差 2 的幂指数倍的 ΔL 。结合开关序列, 每种开关的排列组合都对应一个两臂之间特定的光程差, 光程差可从 0 覆盖至 $(2j-1) \cdot n_g \cdot \Delta L$, 变化的步长为 $n_g \cdot \Delta L$, 其中 n_g 代表波导的群折射率。如图 9(b) 所示, 给出了一个 64 通道的 dFTs, 器件借助一个商用硅光代工艺线制作, 光开关采用热光相移设计。光谱仪集成了 1 个片上 Ge 光电探测器和一个标准的 FC/PC 光纤连接器接口, 使其成为一个独立的“即插即用”的光谱分析器件[如图 9(c) 所示]。为了抑制噪声和提高光谱分辨率, 在光谱重建的过程中, 通过应用非负弹性网方法来求解重建过程中的正则化问题, 并用此算法重建了两种多色光输入时的光谱信号, 实现了高品质的光谱重建^[45]。

Si-dFTs 采用标准的硅光工艺加工和封装, 可实现大规模、低成本制造。同时, 还具有以下优势: 首先, Si-dFTs 的光谱通道数和分辨率随着级联开关数目指数变化, 提升了器件的光谱通道扩展能力, 有助于器件分辨率的提升。其次, 相较于基于热光或电光的折射率调制, Si-dFTs 对波导路径直接的变化可以提供更大范围的光程差调制(超过 100 倍), 可以较小的尺寸实现超高的分辨率。同时, 由于温度引起的光程差的变化和干涉仪臂的物理长度成线性关系, 因此相较于现有的片上傅里叶变换型光谱仪, Si-dFTs 对温度变化更不敏感。最后, 得益于多路的优势, Si-dFTs 相较于色散器件, 拥有较高的 SNR。而且, 该光谱仪只需要一个光电探测器, 进一步减小了系统的复杂度和成本。Si-dFTs 提供了一种高性能、稳定的片上光谱分析解决方案。

3.5 硅基 MEMS 傅里叶变换型片上光谱仪

传统的傅里叶变换光谱仪结构主要是基于迈克尔逊干涉仪, 通过移动干涉仪其中一臂中的反射镜来改变光程差。在芯片上实现此结构对加工工艺的要求较高, 但随着微结构加工工艺的发展, MEMS 技术的突破为此方案提供了一种有效的解决方案。MEMS 型光谱仪的实现首先是将 MEMS 微镜和梳状的致动器粘接在一起以实现迈克尔逊干涉仪中一臂的移动。之后, 随着加工工艺的发展, 出现了利用表面微机械成分立的光学元件实现的 FTIR(Fourier transform infrared)光谱仪^[39]和用光栅反射器来实现迈克尔逊干涉仪结构, 以克服金属化垂直表面所需的额外空间^[40]。这些技术中, MEMS 致动器只能移动有限的距离, 量级为几十 μm , 极大限制了 FTIR 光谱仪的光谱分辨率。同时, 器件还需要大型的 He-Ne 激光器来感应动镜的位置。为了克服这些限制, 开发出了半平面分束器结构和可实现几百 μm 长移动距离的 MEMS 致动器^[41], 同时通过电容传感来感知微镜的位移并进行自校准。这些技术的发展促成了片上 MEMS 光谱仪^[42]。Yasser M Sabry 和 Mazen Erfan 等^[12-13]提出了如图 10 (b) 所示的 MEMS 芯片式 FTIR 光谱仪结构, 由迈克尔逊干涉仪和 MEMS 微致动器构成。MEMS 致动器可以推拉动镜在干涉仪两臂之间产生大的光程差, 同时利用电容传感技术

记录动镜的位移信息。输入/输出光的收集通过多模光纤来实现, MEMS 的输出光直接被探测器接收并转化为电流信号。探测器探测到的干涉电流信息, 结合传感电容记录的位移信息, 可得到光程差和输出光强之间的关系, 对其进行傅里叶变换, 得到输入光的光谱信息。MEMS FTIR 光谱仪探测范围的上限受限于光源、光纤和探测器的响应波长范围, 下限则受限于硅材料的吸收。利用 InGaAs 光电探测器和基于 SiO_2 的光纤, 可以实现 1 300~2 500 nm 的光谱探测范围, 光谱分辨率为 7.5 nm@1 550 nm。在加工制作的过程中, 采用基于 SOI 的深刻蚀技术, 可以确保批量生产, 以实现 MEMS FTIR 光谱仪的低价。采用此结构的光谱仪, 实现了在 10 cm 长度内对 2% 的 C_2H_2 和 CO_2 等气体的探测^[13]。

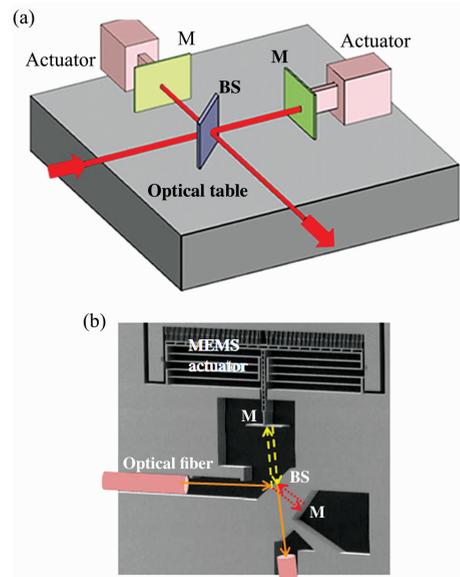


图 10 (a) 迈克尔逊干涉仪的光学实验台, 光学和光机器件置于平台上且光线在平台内传播; (b) 微机械迈克尔逊干涉仪的单片集成^[12]

BS: 分束器; M: 镜子

Fig. 10 (a) Optical-bench Michelson interferometer where the optical and the optomechanical components are arranged on an optical table and the light is propagating inplane with respect to the table; (b) Monolithically integrated micromachined Michelson interferometer^[12]

BS: Beam splitter; M: Mirror

3.6 基于级联 MZI+AWG 的硅基片上光谱仪

通过以上的分析可得, 色散型和傅里叶变换型光谱仪有着不同的优势, 在我们的研究中, 通过将这两种不同类型的光谱仪结构相结合, 提出了一种新型的硅基片上光谱仪结构。此结构通过傅里叶变换型的光谱仪结构首先对入射光进行宽光谱预分光, 这主要是利用其光谱探测范围宽和信噪比高的优势, 之后利用色散型光谱仪结构对预分光后的光谱进行进一步的精细分光, 这主要是利用其分辨率高的优势。由于 MZI 结构适用于宽光谱分光, 因此采用 MZI 结构来实现宽光谱预分光功能。单个的 MZI 结构无法满足芯片的分光

需求,需要对 MZI 结构进行串、并联设计,采用串并联设计的多级 MZI 结构。通过设计调整 MZI 两条延迟线的光程差以及耦合器的耦合系数等参数,可实现所需的带宽的光谱输出。精细分光是通过 AWG 结构来实现。光谱仪的结构如图 11 所示,耦合至波导分光芯片中的宽光谱输入光,首先经级联 MZI 波导宽谱分光模块进行光谱宽带的预分光,对输入光进行粗分,然后经过高分辨率的 AWG 模块分别进行各光谱带内的高分辨率光谱分光,从而实现宽光谱范围、高分辨率的光谱分光。利用此结构,可实现对 1 150~1 550 nm 范围内的光谱分光:输入光的光谱范围为 1 150~1 550 nm,经两级 MZI 结构分光后,得到带宽为 100 nm 的四束输出光。之后,经 4 个中心波长不同的 8 通道的 AWG 结构,得到通道间隔为 12.5 nm 的光谱,合计 32 路光输出。此结构的硅基片上光谱仪将具有较宽带宽的级联 MZI 结构和较高分辨率的 AWG 结构相结合,在实现较大光谱范围的同时可实现较高的光谱分辨率。同时,还可通过对 MZI 结构或 AWG 结构加上热调模块,对其进行光谱差分析来进一步提高分辨率,可实现 nm 级的光谱分辨率。

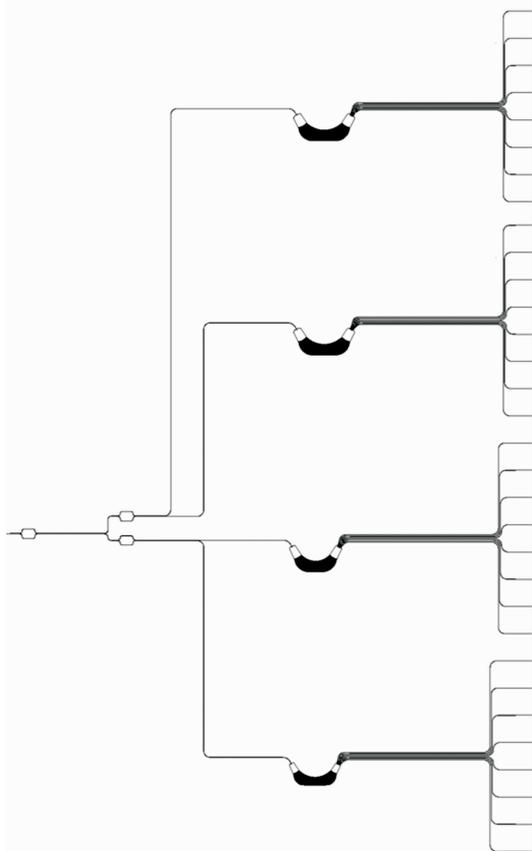


图 11 基于级联 MZI 和 AWG 结构的光谱仪结构图

Fig. 11 Schematic of the on-chip spectrometer based on cascaded MZI and AWG

针对以上几种不同类型的 Fourier 变换型硅基片上光谱仪,SHS 型光谱仪可在较窄的带宽内实现高分辨率,增大光谱范围时,面临着尺寸的限制;SWIFTs 的带宽主要受限于探测器的响应范围和传输波导,同时也可以通过增加波导的

长度来提高分辨率,但相应地探测器阵列的规模要随之扩大,而且器件使用时的对准难度较大;基于热调的片上 Si-FTS 可同时实现较大的光谱探测范围(几百 nm)和较高的光谱分辨率(nm 级),在成为通用型的片上光谱仪方面具有较大的潜力,但同时需要解决热调带来的非线性、热膨胀以及色散等问题。Si-dFTs 型片上光谱仪的光谱通道数和分辨率随着级联开关数目指数变化,极大地提升了器件的光谱通道扩展能力,可以以较小的尺寸实现大的光谱范围和高分辨率,但同时由于涉及热光开关的转换,损耗较大,会引入相位误差;硅基 MEMS 型 Fourier 变换光谱仪,在未引入热光调相的前提下,可实现大的光谱范围(几百 nm)和高的分辨率(<10 nm),系统的集成度较高,难点在于对 MEMS 型光学器件的工艺加工精度要求较高。我国针对微型的 Fourier 变换型光谱仪开展了相关研究,如北京交通大学针对全光纤的 MZI 滤波器、重庆大学对基于 MOEMS 光栅调制器为核心元件的微型近红外光谱仪等开展了相关研究,长春光机所设计了光谱折叠式的微型近红外光谱仪^[43-44],可实现 800~2 400 nm 的光谱探测范围,光谱分辨率约为 10 nm。与色散型的光谱仪相似,国内的研究机构针对变换型微型光谱仪的研究,主要是基于光机器件的微型化研究,针对近几年新兴的基于波导型的片上结构研究较少。

4 发展趋势

根据以上分析可以看出,不同类型的硅基片上光谱仪结构有着各自不同的优缺点,这也决定了它们不同的应用领域。EDG 和 AWG 等色散型的硅基片上光谱仪加工工艺成熟,实现方式简单,可实现较高的分辨率,但同时光谱探测范围会受限,因此适用于对分辨率要求较高的气体传感等领域。傅里叶变换型的硅基片上光谱仪克服了 SNR 和光谱分辨率之间的矛盾,同时也扩展了光谱探测范围。在众多的实现方式中,基于热光调制和数字型的光谱仪结构因其优良的性能更容易被推广应用,适合于针对宽谱吸收特征样品的检测,如液体和固体等。而基于 MEMS 的硅基片上光谱仪无论是在光谱分辨率还是在光谱探测范围方面,都已接近实际应用水平。埃及 Si-Ware 公司已基于此种光谱仪结构开发出了 NeoSpectra 系列产品,公司开发的 NeoSpectra-Micro 产品已内嵌入手机、美容产品等,在消费市场领域拥有巨大的潜力。但同时由于此种类型的光谱仪对 MEMS 加工工艺要求较高,若要大规模推广应用仍面临成本较高等挑战。国内在微型光谱仪的研究起步较晚,且关键的元器件仍主要依赖进口且以跟踪国外的技术研究为主,在尺寸、光谱范围和光谱分辨率等关键参数方面和国外差距较大,针对芯片级光谱仪的研究较少。整体上,国内生产销售微型光谱仪产品的公司较少,主要以代理国外产品为主。但同时,随着物联网技术和智能设备产品的发展,微型光谱仪尤其是芯片级的光谱将发挥不可替代的作用,市场潜力大。

综合分析,芯片级的硅基片上光谱仪未来的发展趋势主要包括以下几个方面:(1)不同类型的光谱分光结构结合发挥作用。光谱仪的结构将不再单一采用某一种分光结构,充

分利用不同分光方式的优势,将不同的分光结构综合采用以实现所需性能。(2)系统集成程度越来越高。随着光子集成技术的发展,光谱仪的集成度将不断提升,光源以及探测器的片上集成会进一步发展。(3)消费类应用潜力巨大。随着芯片级光谱仪性能的提升和成本的降低,可以被轻松集成到

各种产品和平台中,结合实时的数据处理,可实现多种物质的检测,并进一步深入食品安全、家庭空气质量检测和健康分析等领域,有着巨大的应用潜力。尽管面临着诸多挑战,但相信随着硅光加工工艺、光子集成技术以及深度学习技术等的发展,芯片级光谱仪能在将来发挥越来越大的作用。

References

- [1] Kindt J T, Luchansky M S, Qavi A J, et al. *Anal. Chem.*, 2013, 85(22): 10653.
- [2] Ryckeboer E, Bockstaele R, Vanslembrouck M, et al. *Biomed. Opt. Express*, 2014, 5(5): 1636.
- [3] Chen Y, Lin H, Hu J, et al. *ACS Nano*, 2014, 8(7): 6955.
- [4] Tseng V F G, Xie H. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(21): 214102.
- [5] Wan N H, Fan Meng, Tim Schröder, et al. *Nat. Commun*, 2015, 6: 7762.
- [6] Redding B, Liew S F, Bromberg Y, et al. *Optica*, 2016, 3: 956.
- [7] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. *Nat. Photonics*, 2013, 7: 746.
- [8] Subramanian A Z, Ryckeboer E, Dhakal A, et al. *Photonics Res.*, 2015, 3: B47.
- [9] Podmore H, Scott A, Cheben P, et al. *Opt. Lett.*, 2017, 42(7): 1440.
- [10] Akca B I. *Opt. Express*, 2017, 25(2): 1487.
- [11] Herrero-Bermello A, Velasco Aitor V, Podmore Hugh, et al. *Opt. Lett.*, 2017, 42(11): 2239.
- [12] Sabry Y M, Khalil D, Bourouina T. *Laser Photonics Rev.*, 2015, 9: 1.
- [13] Erfan M, Sabry Y M, Sakr M, et al. *Appl. Spectrosc.*, 2016, 70: 897.
- [14] Li J, Lu D f, Qi Z M. *Opt. Lett.*, 2014, 39(13): 3923.
- [15] Lim A E J, Song Junfeng, Fang Qing, et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2014, 20(4): 405.
- [16] Zhou Z, Yin B, Michel J, *Light Sci. Appl.*, 2015, 4: e358.
- [17] Crosnier G, Sanchez D, Bouchoule S, et al. *Nat. Photonics*, 2017, 11: 297.
- [18] Volet N, Spott A, Stanton E J, et al. *Laser Photonics Rev.*, 2017, 11(2): 1600165.
- [19] Chrostowski L, Hochberg M. *Silicon Photonics Design*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [20] Nedeljkovic M, Velasco A V, Khokhar A Z, et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2016, 28(4): 528.
- [21] Coutant O, De Mengin M, Le Coarer E. *Optica*, 2015, 2: 400.
- [22] Souza M C, Grieco A, Frateschi, *Nat. Commun.*, 2018, 9: 665.
- [23] Ma Xiao, Li Mingyu, He JianJun, et al. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(2): 6600807.
- [24] Seyringer D, Bartscher C, Partel S, et al. *Proc. SPIE, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXI*. 2017, 10106: 101061L-1.
- [25] Muneeb M, Vasiliev A, Ruocco A, et al. *Opt. Express*, 2016, 24(9): 9465.
- [26] Wang R, Muneeb M, Sprengel S, et al. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8480.
- [27] Anton Vasiliev, Joris Van Campenhout, Gunther Roelkens. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(6): 8300207.
- [28] Wang P, Menon R. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21541.
- [29] Valley G C, Seer G A, Justin Shaw T. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2529.
- [30] Piels M, Zibar D. *Scientific Reports*, 2017, 7: 43454.
- [31] Nie Q, Wen Z, Huang J. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(8): 1749.
- [32] Liu K, Yu F H. *Optical Engineering*, 2013, 52(1): 013603.
- [33] Yan B, Yuan W, Sun R, et al. *Proc. SPIE, International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*, 2010, 7657: 76570V.
- [34] Qiao D, Kang B, Liu Y, et al. *Laser Physics*, 2013, 23(3): 035601.
- [35] CHEN Xin, WU Ai-min, QIU Chao, et al(陈鑫, 武爱民, 仇超, 等). *Laser Technology(激光技术)*, 2017, 41(3): 361.
- [36] Velasco A V, Cheben P, Florjańczyk M, et al. *Progress in Optics*, 2014, 59: 159.
- [37] Nie X M, Ryckeboer E, Roelkens G, et al. *Optics Express*, 2017, 25(8): A409.
- [38] Kita D M, Miranda B, Favela D, et al. *physics.app-ph*, 2018, arXiv:1802.052705.
- [39] Ayerden N P, Ugur Aygun, Sven Holmstrom, et al. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 7267.
- [40] YE Kun-tao, DONG Tai-yuan, HE Wen-xi, et al(叶坤涛, 董太原, 贺文熙, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2014, 34(10): 2858.
- [41] Mortada B, Sabry Y M, Nagi M, et al. High-throughput Deeply-etched Scanning Michelson Interferometer On-chip. *International Con-*

ference on Optical MEMs and Nanophotonics (OMN) Glasgow, Scotland, 2014.

[42] Saadany B A, Hafez A N, Medhat M, et al. US Patent, 8873125, 2014.

[43] Quan X, Liu H, Lu Z, et al. Optics Communications, 2016, 359: 95.

[44] Wang X, Liu H, Juschkin L, et al. Optics Communications, 2016, 380: 161.

Research Progress of On-Chip Spectrometer Based on the Silicon Photonics Platform

WANG Wei-ping^{1*}, JIN Li²

1. Information Science Academy of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100086, China

2. 38th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China

Abstract Optical spectrometers have become an indispensable tool in various fields that involve optical spectrum analysis. Its application ranges in many areas, such as biochemical sensing, food and drug testing, medical treatment and environmental monitoring. The application of traditional spectrometers is greatly limited due to the size, high power consumption and price, difficult secondary development. With the development of micro processing, miniaturized spectrometers have been developed. Compared to the traditional spectrometers, miniaturized spectrometers have the advantages of low cost, small volume, low power consumption and easy secondary development, which expands the application. However, miniaturized spectrometer, which is usually based on discrete optical components, doesn't have high integration and flexibility. As the requirement of portability becomes higher and higher, further miniaturization and integration has become a trend of spectrometer. On-chip spectrometers, with apparent Size, Weight, and Power (SWaP) advantages, have unprecedented impact on applications ranging from unmanned devices to intelligent platform. Among the methods to realize on-chip spectrometers, silicon photonics offers an approach to realize an integrated and cheap spectroscopic system because of its mature processing and integration. During the last few years, on-chip spectrometers have become an enormously active area, resulting in significant progress. In this review, it summarizes the principle of the silicon based on-chip spectrometer, and introduces the developments of the dispersive spectrometers including spectrometers based on the etch diffraction grating, arrayed waveguide grating and multimode waveguides, and Fourier transform spectrometers including spatial heterodyne, stationary wave, thermos-optic, digital and MEMS Fourier transform spectrometers. We analyze the characteristics and applications of these spectrometers. Our research has also been demonstrated. By combining the mach-zehnder interferometer spectrometer and the arrayed waveguide grating spectrometer, the large spectral range and high resolution have been simultaneously achieved. At the end, we also discuss the future challenges and prospects in this field, which can give some reference for the research of on-chip spectrometers.

Keywords Silicon based; On-chip spectrometer; Dispersion; Fourier transform

(Received Jan. 22, 2019; accepted Apr. 25, 2019)

* Corresponding author