

2 μm 波段片上光子集成器件的研究进展 (特邀)

王 希¹, 刘英杰¹, 张子萌¹, 王嘉宁¹, 姚 勇¹, 宋清海², 徐 科^{1*}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东深圳 518055;

2. 哈尔滨工业大学(深圳)理学院, 广东深圳 518055)

摘 要: 随着大数据业务的迅速发展,为应对持续增长的带宽需求,光纤通信窗口逐渐从传统 C 波段向 C+L 波段拓展。探索新波段也成为了光通信领域迫切需要解决的关键问题。位于近红外与中红外之间的 2 μm 波段具有低传输损耗和宽增益谱范围等优势,有望成为下一个光纤通信和空间激光通信的窗口。在商用光电子器件尚不成熟的情况下,实验室条件下已实现单波 100 Gbit/s 光传输记录。与此同时,2 μm 波段功能性器件的研究也成为备受关注的热点。文中重点介绍了 2 μm 波段硅光子器件的研究进展,以及基于 III-V 族、铌酸锂薄膜、氮化硅、硫系玻璃等其他材料的一系列功能性器件,最后对 2 μm 波段片上光子集成器的发展前景进行了展望。

关键词: 2 μm 波段; 集成光学; 片上集成光子器件; 光子集成

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220087

Research progress in 2 μm waveband on-chip photonic integrated devices (*Invited*)

Wang Xi¹, Liu Yingjie¹, Zhang Zimeng¹, Wang Jianing¹, Yao Yong¹, Song Qinghai², Xu Ke^{1*}

(1. Department of Electronic & Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;

2. Department of Science, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Driven by the development in big data services, the conventional optical fiber communication window was shifting from C-band to C+L band to meet the continuously increasing demand for bandwidths. Exploiting new wavebands became a crucial problem within the optical communications community. The 2 μm spectral range between near-infrared and mid-infrared held advantages of low transmission loss and broad gain bandwidth, which made it a promising candidate for the next window of free space laser and optical fiber communications. Even though the commercialization of the 2 μm optoelectronic devices was at early stage, recorded single-lane 100 Gbit/s transmission had been achieved in the laboratory. In the meantime, developing functional elements in this wavelength range was attracting extensive interests. In this paper, the recent advances of 2 μm silicon photonic device were introduced. Photonic integrated components on other platforms like III-V, thin-film lithium niobate, silicon nitride, and chalcogenide glass were also discussed. Finally, the 2 μm was envisioned on-chip photonic integrated devices.

Key words: 2 μm waveband; integrated optics; on-chip integrated photonic device; photonic integration

收稿日期:2022-01-24; 修订日期:2022-02-20

基金项目:国家自然科学基金(61875049,U21 A20454);深圳市基础研究学科布局项目(JCYJ20180507183418012)

作者简介:王希,男,博士生,主要从事中红外光子集成器件方面的研究。

通讯作者:徐科,男,教授,博士,主要从事微纳光学与集成光学及其应用方面的研究。

0 引言

大数据业务的普及导致网络流量的迅速增长,光纤通信系统面临传输容量扩容的迫切需求。目前C+L波段的光传输系统正逐步走向商用,传输容量可在现有C波段光通信的基础上提升1~2倍。但持续增长的带宽需求促使人们不断地对新波段进行探索。尽管光传输波段在近红外有可能进一步向S波段甚至O波段拓展,但如此宽谱的光纤放大问题是一大挑战。事实上,在位于近红外与中红外之间的2 μm 波段,掺铥光纤具有超过200 nm的增益谱宽并且放大器已经商用,使这一波段的宽带光通信具有一定可行性^[1]。2005年,Roberts等理论上预测一种空芯光子晶体光纤在2 μm 波段的损耗低至0.1 dB/km^[2],2 μm 波段在光通信领域的潜力迅速吸引了人们的注意。2012年欧洲光通信大会(ECOC)上,首次报道了基于空芯光子带隙光纤的2 μm 波段光传输,速率为8 Gbit/s^[3]。随后,基于这一新波段的光传输研究备受关注^[4-7],国内外学者一直致力于提升传输速率与容量先后报道了多种光传输的方案,目前已实现单通道100 Gbit/s的速率^[8]。此外,2 μm 波段为大气低损耗传输窗口和人眼安全波段,在自由空间激光通信、遥感、成像等应用领域也具有极大潜力。

然而,2 μm 波段的有源和无源器件体系还很不完善。尽管窄线宽半导体激光器、电光调制器、光电探测器、滤波器等已商用,但在性能、功能和成熟度上仍不及传统C波段器件。长期以来受到光通信产业的驱动,光电子器件的研究尤其是集成光学的发展也主要集中在近红外的几个低损耗窗口。随着光纤通信窗口向新波段延伸,2 μm 波段的光电子器件研究正在兴起。尤其是集成光学领域,2 μm 波段的硅光子器件研究十分活跃。其他如III-V族、铌酸锂薄膜、氮化硅、硫系玻璃等材料体系的片上功能性器件也取得了诸多进展。笔者回顾了近年来2 μm 波段片上光电子器件的研究进展,从有源和无源器件两方面进行介绍,同时展望了新波段集成光电子器件的发展方向。

1 有源器件

1969年,贝尔实验室的Stewart Miller首次提出集成光学的概念,而片上集成也是光电子器件的发展趋势。其中,有源器件如激光器、光放大器、调制器和探测器等是片上集成的核心器件。本节将重点介绍2 μm 波段片上激光器、光放大器、电光调制器和光电探测器的最新研究进展。

1.1 激光器和光放大器

激光器和光放大器是有源器件的重要组成部分。在2 μm 波段,半导体激光器、光纤激光器、半导体光放大器和掺铥光纤光放大器等分立器件都已经商用,为新波段光通信的研究奠定了一定基础。近年来,基于异质集成的片上激光器和光放大器也取得了一些进展。2014年,Gu等报道了一种基于InP的type-I型量子阱半导体激光器^[9],其工作波长为2.4 μm ,峰值输出功率为11 mW。2016年,Wang等通过将III-V族材料和SOI异质集成,采用type-II型量子阱作为有源区,产生了中心波长为2.32 μm ,输出功率为1.3 mW的激光^[10]。除了III-V族半导体激光器外,还可以在介质中掺杂稀土离子(Tm^{3+} 、 Ho^{3+})^[11-12]作为增益介质实现粒子数反转,从而产生2 μm 波段的激光。除此之外,Latawiec等基于拉曼效应实现了一种2 μm 波段的片上连续可调谐激光器^[13],可调谐波长范围大于100 nm,输出功率大于0.25 mW。

在片上光放大器方面。2017年,Volet等报道了硅基III-V族异质集成的半导体光放大器^[14],器件增益为13 dB。2019年,Kiania等则在氮化硅平台实现了增益为7.6 dB的掺铥氧化碲波导光放大器^[15]。表1总结了各类激光器以及光放大器的增益介质材料、工作波长、输出功率/增益等性能参数。总体来说,2 μm 波段片上激光器和光放大器大多基于III-V族和稀土掺杂的有源材料与衬底异质集成的方案,在性能上还有较大提升空间。另外,基于高Q值微腔的克尔孤子光学频率梳有望在2 μm 实现多波长相干光源,尤其是硅基微腔在该波段由于双光子吸收的减弱而具有较大潜力,为片上光源提供了一种潜在的新途径。

表 1 已报道的 2 μm 波段片上激光器和光放大器性能

Tab.1 Reported performance of on-chip lasers and optical amplifiers at 2 μm band

Ref.	Device	Active material	Operating wavelength/μm	Output power/Gain
[9]	Laser	InAs/InGaAs	2.4	11 mW
[10]	Laser	InGaAs/GaAsSb	2.32	1.3 mW
[16]	Laser	InGaAs/GaAsSb	2.2-2.4	NA
[11]	Laser	TeO ₂ :Tm ³⁺	1.815-1.895	4.5 mW
[12]	Laser	Al ₂ O ₃ :Ho ³⁺	2.02-2.1	15 mW
[13]	Raman laser	Diamond	1.95-2.05	>0.25 mW
[14]	Amplifier	InP/GaInPAs	2	13 dB
[15]	Amplifier	TeO ₂ :Tm ³⁺	1.86-2	7.6 dB

1.2 调制器

硅基电光调制的原理主要基于载流子色散效应,在波导掺杂形成的 P-N 结内,通过载流子浓度的变化对光的折射率进行调制。根据 Lorentz-Drude Model [17],硅波导 P-N 结的载流子调制效应与波长平方成正比,理论上 2 μm 波段的硅基调制效率比 C 波段更高。而且随着工作波长拓展到 2 μm,硅材料的非线性双光子吸收显著减小 [18],使得调制器饱和功率更高。2012 年,IBM 公司首次在 2 165 nm 报道了一种基于自由载流子注入型的硅基马赫增德调制器 (MZM) [19]。该调制器的实测 $V_{\pi} \cdot L$ 为 0.12 V·mm,静态消光比为 -23 dB,但受到注入载流子寿命的限制,最终只实现了 3 Gbit/s 的高速信号的调制。该工作首次从实验上验证了硅波导自由载流子色散效应在 2 μm 波段用于高速调制的可行性。随后,2018 年,南安普顿大学 Cao 等在 2 μm 波段基于载流子色散效应分别报道了载流子耗尽型的 MZM 和微环调制器 (MRM) [20]。其中, MZM 在 1950 nm 波长实现了 20 Gbit/s 的 NRZ 调制格式信号的调制,消光比为 5.8 dB,插入损耗为 13 dB。在 4 V 反向偏压下,调制效率 ($V_{\pi} \cdot L_{\pi}$) 为 2.68 V·cm。MRM 则在 2 μm 波段实现了 3 Gbit/s 的幅度调制,消光比为 2.3 dB,功耗为 2.38 pJ/bit。2020 年,笔者也在 2 μm 波段报道了基于单端推挽式行波电极的 MZM,并基于该调制器实现了 50 Gbit/s 的 NRZ 调制 [21]。2021 年,笔者课题组研制的硅基 MZM 性能得到进一步提升,实现了 80 Gbit/s PAM-4 的高速调制 [22],并在实验上测得调制带宽超过 18 GHz,调制效率为 1.6 V·cm。此外,上海交通大学 Shen 等基于硅基微环实现了

18 GHz 电光带宽和 <1 V·cm 调制效率的低功耗调制器 [23]。该调制器在波长 1960 nm 处实现了 50 Gbit/s 的高速调制,这也是目前已公开报道的 2 μm 波段硅基微环调制器的最高调制速率。近年来,薄膜铌酸锂的生长、键合以及刻蚀工艺得到显著进展,解决了铌酸锂体调制器驱压过高的问题。Wang 等在 C 波段基于薄膜铌酸锂材料实现了仅需 0.2 V_{pp} 驱动电压,达到了直驱水平 [24]。浙江大学 Pan 等则首次在 2 μm 波段报道了薄膜铌酸锂调制器 [25] V_{π} 为 7.34 V,调制效率为 3.67 V·cm。而且该调制器实现了 25 Gbit/s 的调制速率,3 dB 带宽 >22 GHz。图 1 总结了截止到目前 2 μm 波段片上调制器的研究进展。可以看出 2 μm 波段片上 MZM 的发展非常迅速,性能提升也很大,但 MRM 的发展才起步。并且随着铌酸锂工艺的突破,有望实现 2 μm 波段硅/铌酸锂异质集成的高性能调制器。

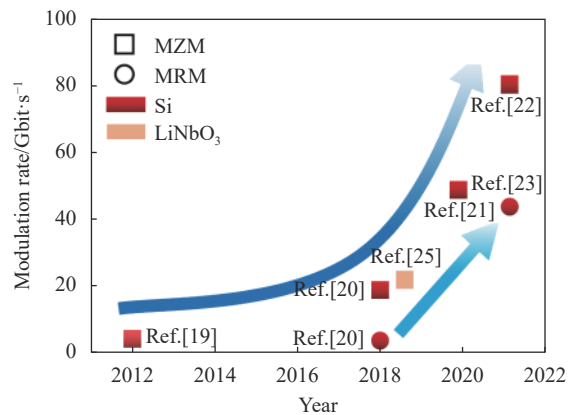


图 1 2 μm 波段片上调制器研究进展 [19-23,25]

Fig.1 Research progress of on-chip modulators in 2 μm waveband [19-23,25]

1.3 探测器

光电探测器是光通信系统接收端的关键有源器件。锗材料因其 CMOS 兼容性, 在 1.31 μm 和 1.55 μm 波段的硅基光子集成中广泛用于片上光电探测。但锗材料的本征吸收在 2 μm 显著降低, 在这一波段并不是理想光电探测材料。为此, 人们报道了多种基于硅基衬底的能带工程方法, 提高 2 μm 波段的光电探测效率。第一种方法是利用材料的应力改变能带结构, 增强本征吸收。硅基衬底上进行锗外延的过程中由于晶格失配导致的应变会使锗材料吸收边带红移, Anthony 等报道的锗 SACM 雪崩探测器在 1 850 nm 处实现了 0.31 A/W 的响应度, 但在 1 970 nm 波长探测器响应度很快降至 0.08 A/W [26]。第二种方法是引入缺陷态能级增强吸收, 该方案在 1 550 nm 的硅探测器中已经得到广泛验证。2015 年, 南安普顿大学的 Ackert 等通过对硅波导进行低剂量的惰性离子注入, 并优化退火条件引入晶格缺陷 [27], 硅波导中的缺陷态显著增强了 2 μm 波段的光吸收, 实现了 0.3 A/W 的响应度。该器件 3 dB 带宽达到 12.5 GHz, 并且支持 28 Gbit/s 的调制速率。第三种方法是通过调节 III-V 族化合物各元素组分达到调节带隙的作用, 从而将光探测范围扩大到 1.55 μm 以上, 这是 Ge 和 Si 所不能达到的。南洋理工大学的 Xu 等采用 GeSn/Ge 合金多重量子阱 p-i-n 光电探测器 [28], 3 dB 带宽达到大于 10 GHz。Tossoun 等报道了 InP 基 InGaAs/GaAsSb type-II 型多量子阱 p-i-n 光电探测器 [29], 该探测器利用 InGaAs/GaAsSb type-II 型多量子阱吸收区吸收中红外波长的光。在 2 μm 波段的响应率为 0.84 A/W, 3 dB 带宽达到 >10 GHz。第四种方法是将低维材料与硅波导的异质集成, 是另一种有效的片上光电探测的技术。由于低维材料的光学、电学特性优异并且转移工艺简单这种方案被广泛用于各种不同波段的光电探测。2019 年, 浙江大学 Yin 等报道了基于硅/黑磷范德华异质结的硅基波导光电探测器 [30], 在 2 μm 波段实现了 306.7 mA/W 的响应度, 3 dB 带宽为 1.33 GHz。为提高器件带宽, 该课题组 Guo 等通过引入硅-石墨烯混合等离子体波导 [31], 实现了 70 mA/W 的响应度, 器件的 3 dB 带宽达到 >20 GHz。图 2 总结了截止到目前 2 μm 波段片上光电探测器的研究进展。总体来

说, 2 μm 波段片上光电探测器主要集中在 III-V 族材料体系, 硅基与 III-V 族材料异质集成是未来发展趋势之一。

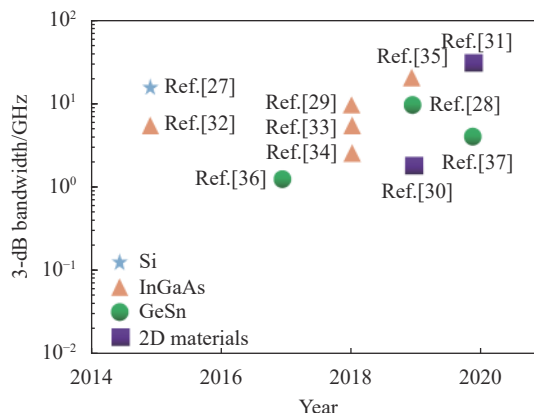


图 2 2 μm 波段片上不同材料体系探测器研究进展 [27-37]

Fig.2 Research progress of on-chip detectors with different material systems at 2 μm waveband [27-37]

2 无源器件

除上述有源器件之外, 光子集成还需要大量无源功能性器件。尽管 C 波段光波导的模式、色散、偏振、非线性效应、亚波长效应等光学性质及光场调控方法已经被广泛研究, 开发出诸多类型的无源功能性器件。但随着波长尺度的改变, 2 μm 新波段的光波导及其无源器件仍有待探索。本节将重点介绍 2 μm 波段几种有代表性的硅基无源器件的最新进展, 并对硫系玻璃、磷化铟以及氮化硅等材料体系的无源器件做了简要介绍。

2.1 光波导

光波导是光子集成的基本单元, 广泛用于片上导光、互连以及各种功能性器件。常规波导多为条形或脊型波导, 其模场特性主要取决于波导宽度、高度以及刻蚀深度。为了与 C 波段器件的制作工艺兼容, 2 μm 波段的硅基光波导也大多基于 220 nm 顶层硅的 SOI。但波导的设计需综合考虑单模条件以及波长尺度增大带来的模式泄漏和侧壁散射损耗等因素。故 2 μm 波段硅基光波导的宽度通常较 C 波段有所增加, 在 500~600 nm 之间居多 [38]。笔者首次在 2 μm 波段报道了不同刻蚀深度的硅弯曲波导损耗 [39], 对于全刻蚀的弯曲波导, 半径为 20 μm 的平均弯曲损耗仅

为 0.026 dB/弯曲,而对于刻蚀深度为 130 nm 的弯曲波导,由于对模式相对较弱的限制,半径为 20 μm 的平均弯曲损耗为 0.095 dB/弯曲。相比于 SOI, 硫系玻璃材料具有更宽的透明度窗口 (0.8~20 μm), 并且在 2 μm 时具有极低的线性和非线性传输损耗制^[40]。Shen 等制备的光波导损耗为 1.4473 dB/cm, 当弯曲半径大于 80 μm 时, 硫系材料弯曲波导损耗在 0.1 dB/mm 以下, 这是因为 As_2S_3 的折射率较低, 对光场的束缚能力较弱, 需要较大的弯曲半径才能减小弯曲损耗^[41]。

除弯曲波导外, 交叉波导也是大规模片上光互连的基本组件。Ma 等报道了 2 μm 波段插入损耗为 (0.08±0.011)dB, 串扰为 -34 dB 的硅基交叉波导^[30]。然而这种基于 MMI 的交叉波导, 往往尺寸较大, 特别是对于多模交叉波导, 需要同时满足每个模式的自成像相位条件, 这将极大地增大器件的尺寸, 给大规模光子集成带来了困难。Muratsubaki 等利用直接二进制搜索的方法实现了一种基于类光子晶体亚波长结构的四模交叉波导^[42], TE_0 、 TE_1 、 TE_2 和 TE_3 模式的仿真插入损耗分别为 0.19 dB、0.30 dB、0.21 dB 和 0.59 dB, 并且所有模式的串扰均 < -30 dB。这种结构大大缩小了交叉波导的尺寸, 但同样对制备工艺要求更高。

此外, 在特殊波导结构的设计与应用方面也有一些进展, Ruan 等报道了狭缝亚波长光栅波导^[43]。该波导由两条间隔为 100 nm 的亚波长光栅波导组成, 狭缝结构可以增强间隙区域中的光场限制, 减小模式泄漏, 降低传输损耗。测得的传输损耗为 15 dB/cm, 并在该波导上演示了 5 Gbit/s 高速调制信号传输实验。除了硅之外, 氮化硅材料因其具有低损耗和低相位误差等优点而被广泛研究。这对于设计低损耗波导、高 Q 值谐振器以及非线性光学应用具有重要意

义。Lamy 等在氮化硅材料平台研制了尺寸为 1.8 μm × 0.3 μm 的氮化硅波导^[44], 波导传输损耗为 2 dB/cm, 并在氮化硅波导上实现了 10 Gbit/s 的高速调制信号的传输。此外, 还演示了基于该波导的

波长转换实验, 当泵浦光功率达到 460 mW 时, 获得了 -18 dB 的波长转换效率。该工作为 2 μm 波段光子集成提供了另一个候选平台, 并为实现片上光源提供了初步参考依据。

2.2 光栅耦合器

光栅耦合器是实现光从片外到片上光波导耦合的重要器件。它利用光栅的衍射效应改变光传播方向来实现耦合, 对于不同阶数的衍射, 光的衍射方向不同。光栅耦合器尺寸小, 无需端面抛光工艺, 支持大规模集成和晶圆级测试。2017 年, 笔者报道了一种基于 SOI 的 2 μm 波段一维全刻蚀光栅耦合器^[39], 实现了 -8.4 dB 的峰值耦合效率。耦合效率偏低主要原因是光栅耦合器的方向性较差。随后, Ma 等报道了一种浅刻蚀光栅耦合器^[38], 通过改变刻蚀深度来优化方向性, 实现了 -7.9 dB 的耦合效率。该光栅耦合器的耦合效率相对于之前报道的工作有了一定的提升。笔者在顶层硅为 340 nm, 氧化硅掩埋层为 3 μm 的 SOI 上制备了一种二维全刻蚀光栅耦合器^[45], 实现了 -6.2 dB 的耦合效率。2020 年, 上海交通大学 Sheng 等基于硫系材料制作了光栅耦合器^[41]。该光栅耦合器峰值耦合效率为 -4.3 dB, 得益于 As_2S_3 材料在 2 μm 波段具有较为平坦的色散曲线, 器件的 1 dB 带宽为 74.2 nm, 3 dB 带宽为 123.6 nm。目前 2 μm 波段光栅耦合器的耦合效率如表 2 所示。可以看出 2 μm 波段光栅耦合器的耦合效率处于较低的水平, 这是因为为了与 C 波段器件的制作工艺兼容, 光栅耦合器受到所采用基底的衍射方向性所限制。

表 2 已报道的 2 μm 波段光栅耦合器性能

Tab.2 Performance comparison of reported 2 μm band grating couplers

Ref.	Material platform	Wavelength/nm	Coupling efficiency/dB
[39]	SOI	1 952	-8.4
[38]	SOI	2 020	-7.9
[45]	SOI	1 952	-6.2
[41]	As_2S_3	1 950	-4.3

2.3 功率分束器

功率分束器是片上光学器件与系统中常见的功能性器件之一。基于平面光波导的功率分束器主要由如下几种结构形式：定向耦合器、Y 分支、多模干涉耦合器 (MMI) 等。尽管定向耦合器在分束比例的设计上灵活度较高,但对工艺误差极其敏感而且带宽有限。基于自成像原理的 MMI 结构则鲁棒性更高。浙江大学的 Ma 等人报道了一种 1×2 型 MMI 分束器^[38],通过测量如图 3(a) 所示的级联结构,每个输出端测得平均插入损耗为 (3.03 ± 0.43) dB,并且每个输出端口的测量传输谱如图 3(b) 所示。这种基于 MMI 的功率分束器虽然可以实现较为精准比例的分束功能,但器件带宽仍受到硅波导色散曲线不平坦的制约。另一方面受制于相位匹配条件,器件的拍长通常导致器件尺

寸过大。为了提升功率分束器的带宽并减小器件的尺寸,笔者报道了一种基于亚波长光栅倒锥的 Y 分支型 3 dB 分束器^[46],结构示意图如图 3(c) 所示。其中亚波长光栅能够增大耦合区域的有效折射率,起到增强耦合强度、减小耦合长度的作用。该结构的另一个优势是可以通过优化设计亚波长光栅的占空比和周期对器件的色散进行优化,从而实现超大带宽。图 3(d) 为分束器的两个输出端口的光谱,可以看出该器件的 0.5 dB 带宽超过 55 nm,两输出通道的插入损耗均低于 0.56 dB。分束器广泛应用于光开关、调制器、片上神经网络以及光计算等器件,但目前大多数报道均为等比例分束器件。Xie 等利用“二维码”超构波导的逆向设计方法实现了一种超紧凑型 1×4 任意比例功率分束器^[47],根据不同结构分别实现了 1 :

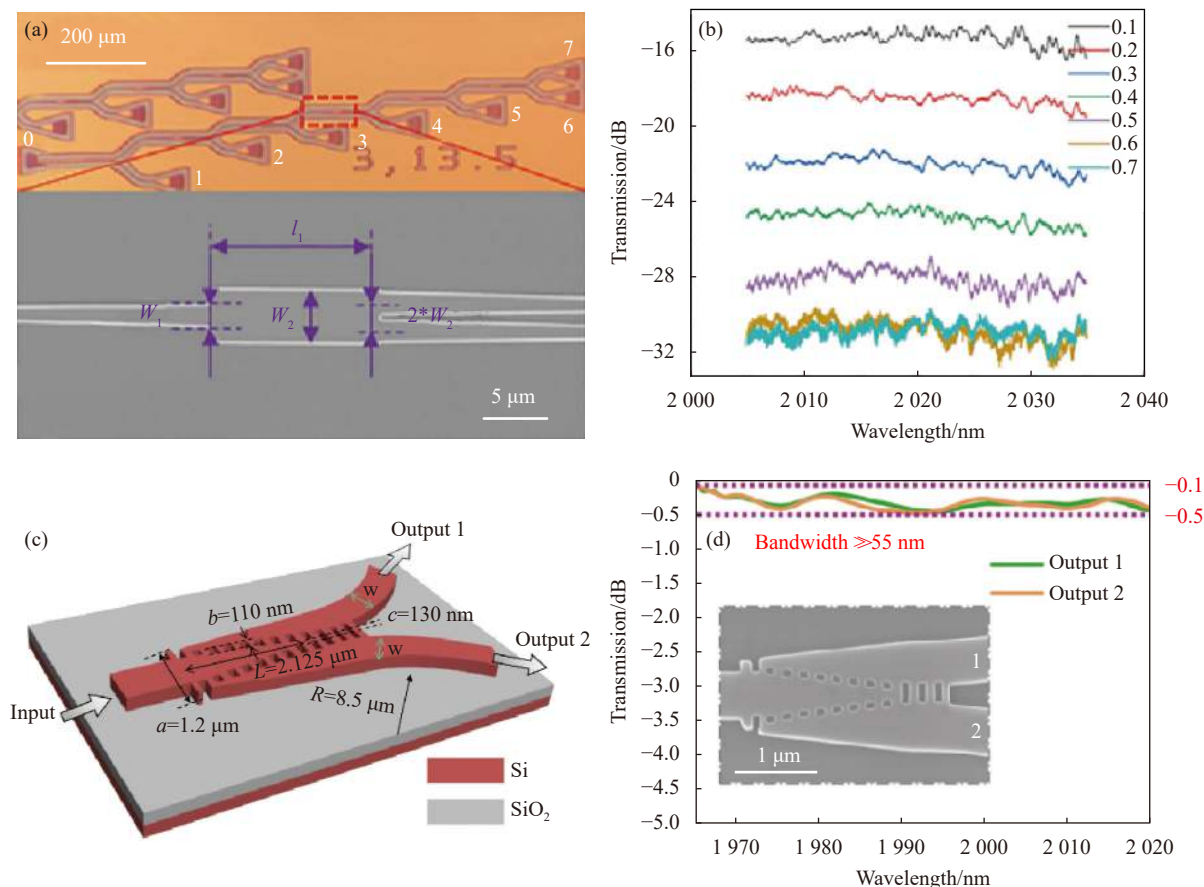


图 3 (a) 级联 MMI 的 SEM 图及单个 MMI 的 SEM 图^[38]; (b) 级联 MMI 的测试图^[38]; (c) 一种基于亚波长光栅结构的功率分束器结构示意图^[46]; (d) 基于亚波长光栅的分束器实验结果图, 插图为器件 SEM 图^[46]

Fig.3 (a) SEM image of cascaded MMI and SEM image of a single MMI^[38]; (b) Test image of cascaded MMI^[38]; (c) Schematic diagram of a power beam splitter based on subwavelength grating structure^[46]; (d) Experimental result of the beam splitter based on the subwavelength grating, the inset is the SEM image of the device^[46]

1 : 1 : 1、2 : 2 : 1 : 1、2 : 2 : 2 : 1 和 4 : 3 : 2 : 1 四种分束比例, 器件传输效率依次为 77%、73%、75% 和 71%。

2.4 波分复用器

波分复用器是实现大容量光通信的核心器件之一。尤其对于密集波分复用, 通常利用阵列波导光栅 (AWG) 结构来实现, 该器件在 C 波段已被广泛研究且实现商用。在 2 μm 波段, 加州大学 Stanton 等首次在 500 nm 顶层硅厚度的 SOI 衬底上实现了的 8 通道 AWG^[48], 器件实物如图 4(a) 所示。从图 4(b) 所示的 AWG 实测光谱图可以看出, 每个波长通道的损耗约为 2.4 dB, 串扰为 -31 dB。然而, 500 nm 的顶层硅厚度并不是目前硅光流片的标准厚度。笔者在 220 nm

顶层硅的 SOI 衬底上分别实现了 8 通道^[49] 以及 64 通道^[50] 的波长可调谐的 AWG, 图 4(c) 为 64 通道器件实物图。图 4(d) 中的实测光谱图表明了该 64 通道 AWG 通道间隔为 50 GHz, 插入损耗为 5 dB。AWG 光谱可利用波导热光效应进行调谐, 调谐效率为 0.27 GHz/mW。由于波长调谐范围可覆盖一个自由光谱范围 (FSR), 因此该 AWG 可在带宽范围内任意波长工作。此外, 南安普顿大学的 Zhang 等报道了基于 InP 的 8 通道阵列波导光栅^[51], 器件插入损耗为 12.8 dB。基于该 AWG, 实现了 8 通道高速调制信号的波分复用, 使得数据容量达到 150 Gbit/s, 并在空心光子带隙光纤中传输了 1.12 km。

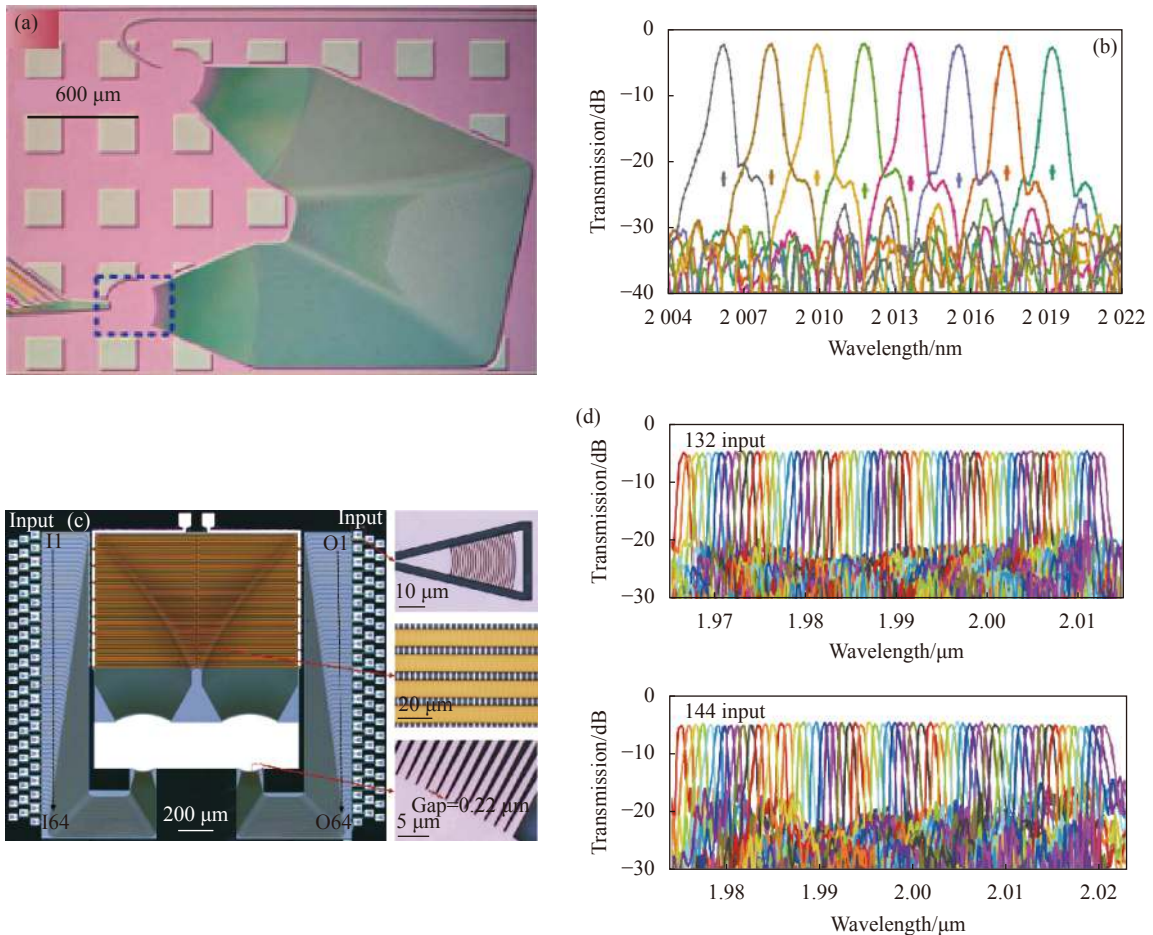


图 4 (a) 和 (b) 分别为基于顶层硅厚度为 500 nm 的 SOI 的 AWG 显微镜图及实验结果图^[48]; (c) 和 (d) 分别为基于顶层硅厚度为 220 nm SOI 的 AWG 显微镜图及实验结果图^[50]

Fig.4 (a) and (b) are AWG electron microscope images and experimental results images based on SOI with a top silicon thickness of 500 nm, respectively^[48]; (c) and (d) are AWG electron microscope images and experimental results images based on SOI with a top silicon thickness of 220 nm, respectively^[50]

2.5 模分复用器

模分复用是利用互相正交导模实现信号复用的技术,在大容量光通信与光互连中有重要应用。与波分复用相比,模分复用仅需要单波长光源,无需复杂的波长控制电路和多波长激光器阵列,具有低复杂度和低成本等优势。2018 年, Huang 等基于锥形非对称定向耦合器实现 2 μm 波段的片上双模式分复用器^[52]。相比于基于传统定向耦合器的模分复用方案,锥形非对称定向耦合器对工艺误差容忍度更大,能有效提高器件的带宽。该模分复用器在 80 nm 的波长范围内,平均串扰均小于-18 dB。Zheng 等在原结构的基础上

将 2 模式的复用扩展到 4 模式^[53-54]。实验结果如图 5 (a)~(d) 所示, TE₀、TE₁、TE₂ 和 TE₃ 模式的平均插入损耗分别为 1.3 dB、2.6 dB、4.8 dB 和 5 dB,串扰均小于-18 dB。除了硅光器件之外,上海交通大学 Shen 等基于硫系材料研制出 3 模式模分复用器^[41],该器件的 TE₀、TE₁ 和 TE₂ 模式的最小插入损耗分别为 0.1 dB、1.22 dB 和 1.9 dB,串扰均小于-20 dB,并且 1 dB 带宽均超过 80 nm。该工作表现出硫系材料光波导的超低损耗和良好的色散性能。作者对该模式模分复用系统进行了高速信号传输测试,实现了 2 μm 波段的片上 3 模式 (3×80 Gbit/s) 模分复用光互连。

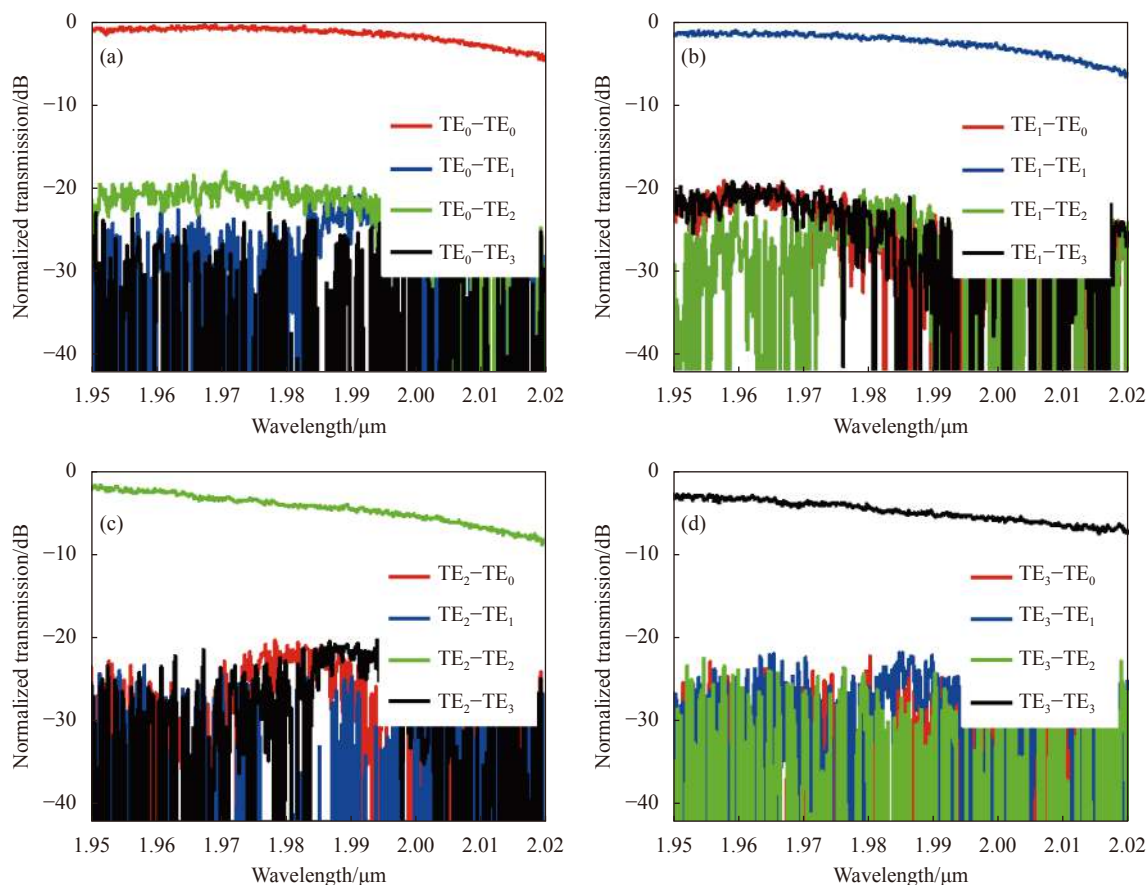


图 5 (a)~(d) 分别对应该模分复用器 TE₀、TE₁、TE₂、TE₃ 四个输出端口的透射光谱^[53]

Fig.5 (a)-(d) correspond to the transmission spectra of the four output ports of the mode division multiplexer TE₀, TE₁, TE₂, and TE₃, respectively^[53]

2.6 滤波器

光学滤波器广泛应用于光通信、信号处理、微波光子学等系统中。对于集成光学,几种代表性的片上滤波器结构包括:微环谐振器、阵列波导光栅、马赫增德干涉仪 (MZI) 以及波导布拉格光栅等。在 2 μm 波段,2018 年浙江大学 Liu 等报道了一种基于多模波

导光栅的宽带滤波器^[55]。器件实物的显微镜照片及亚波长光栅结构的扫描电子显微镜照片如图 6(a) 所示。该器件的实测插入损耗为 1 dB,0.5 dB 带宽为 20 nm,旁瓣抑制比>20 dB。图 6(b) 展示了不同光栅周期下的器件传输谱,表明该器件在三个不同的波长分别实现了带通滤波特性。并且滤波器的工作波长

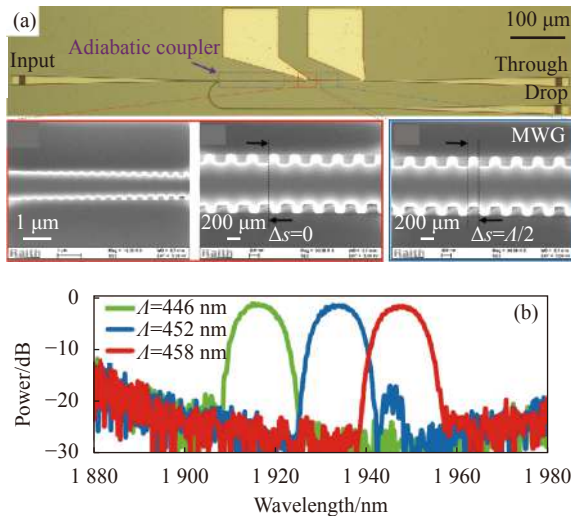


图 6 (a) 多模波导光栅滤波器显微镜图及 SEM 图^[55]; (b) 不同光栅周期下的透射谱^[55]

Fig.6 (a) Electron microscope and SEM of multimode waveguide grating filter^[55]; (b) Transmission spectrum under different grating periods^[55]

可以通过热光效应进行调谐, 调谐效率约为 0.16 nm/mW。同年, 笔者基于一种跑道型微环谐振器实现了窄带滤波功能^[39]。该滤波器的 FSR 为 12 nm, 消光比为 20 dB, 3 dB 带宽为 1.3 nm, 同样可以通过波导热光效应实现波长调谐功能, 热调谐效率约为 0.17 nm/mW。

2.7 光开关

硅基光开关的工作原理主要基于波导的热光效

应和干涉。与自由载流子色散效应相比, 热光效应可调谐范围大、损耗低, 但器件响应速度较慢、热传递效率低。2019 年, Shen 等基于 2 μm 波段的 2×2 MZI 报道了一种热光开关^[56], 该器件在 32.3 mW 的功耗下, 开关消光比 (on-off ratio) 大于 30 dB, 平均开关时间为 ~15 μs。同年, 笔者报道了一种基于非对称 1×2 MZI 的硅光子热光开关^[57]。与上述光开关相比, 该器件实现了更快的响应, 开关时间分别为 ~6 μs 和 ~4 μs。并且该器件在 1985 nm 波长下的插入损耗仅为 0.2 dB, 消光比为 27 dB。2020 年, 南洋理工大学 Xu 等实现了基于 MZI 的 1×2 以及 1×8 光开关阵列^[58]。对于单个单元的光开关而言, 在 23 mW 的功耗下, 插入损耗为 1.1 dB, 开关时间低于 38 μs, 串扰低于 -25 dB。当扩展到 1×8 光开关后, 由于各个光开关单元累积的相位误差增大, 会导致串扰增大, 但仍然保持在 -21 dB 的水平。2021 年浙江大学 Zhong 等通过在硅波导中进行低浓度掺杂形成电阻, 直接在硅波导层产生焦耳热对器件进行热光调控。与金属电阻的热光调控相比, 该方案中热传导无需经过介质层可对光波导进行直接加热, 但掺杂导致波导损耗略有增加。基于该方案, 作者实现了基于 MZI 和微环两种光开关器件^[59], 由于对波导直接进行加热, 这种光开关的时间相应可以达到微秒量级, 相关实验结果如表 3 所示。表 3 总结了 2 μm 波段片上光开关的几种方案及其性能。

表 3 已报道的 2 μm 波段光开关的性能

Tab.3 Reported performance of optical switches at 2 μm waveband

Ref.	Structure	Wavelength/nm	P_{π} /mW	Rise/Fall time τ/μ s	Insertion loss/dB	Extinction ratio/dB
[56]	MZI	2	32.3	15/15	2-3	30
[57]	MZI	1985	84.3	6/4	0.2	27
[58]	MZI	1910	23	33.08/37.84	1.1	25
[59]	MZI	2023	25.21	3.49/3.46	1.13	17
[59]	MRR	2024	3.33	3.65/3.70	N/A	N/A

3 总结与展望

文中综述了 2 μm 波段片上集成光子器件的研究进展, 重点介绍了硅以及薄膜铌酸锂、硫系材料、氮化硅以及 III-V 族等材料体系的片上功能性器件, 并对各材料体系在 C 波段和 2 μm 波段的差异作了如

表 4 所示的总结与对比。由此看出 2 μm 波段对几种主流材料来说都是透明窗口, 可实现绝大部分无源器件。有源器件则不同材料之间具有一定互补性, 因此混合集成以及异质集成是实现 2 μm 波段系统级集成的趋势。

表 4 基于各材料体系片上器件的应用对比

Tab.4 Application comparison of on-chip devices based on various material systems

Material	Δn	Operating wavelength/ μm	Lasers/amplifiers	Modulator	Photodetector	Passive devices
SOI	2.01-2.45	1.55	×	√	√	√
		2	×	√	×	√
Si ₃ N ₄	0.55-0.98	1.55	×	×	×	√
		2	×	×	×	√
As ₂ S ₃	0.98-1.42	1.55	×	×	×	√
		2	×	×	×	√
LiNbO ₃	0.76-1.2	1.55	×	√	×	√
		2	×	√	×	√
III-V	1.7-2.13	1.55	√	×	√	√
		2	√	×	√	√

2 μm 波段在光纤通信、自由空间激光通信、遥感等领域有巨大应用潜力, 基于不同材料体系的大部分光电子器件可借鉴相对成熟的 C 波段。对于无源器件, 硅、薄膜铌酸锂、硫系材料、氮化硅以及 III-V 族等材料都适用于 C 波段和 2 μm 波段。但在 2 μm 波段, 由于波长尺度显著增大导致模场尺寸相应变大。在设计波导横截面时, 不仅要考虑单模条件, 还要考虑因模场面积增大带来的波导侧壁损耗。这使得 2 μm 波段的波导尺寸比 C 波段稍大, 但更有利于设计工艺精度要求较高的器件, 如亚波长结构器件。对于有源器件, 由于各材料体系带隙存在明显差 2 μm 异, 器件性能表现出较大的不同。如锗探测器在 C 波段具有较高响应度, 但本征吸收的截止波长远小于 2 μm 。

总之, 波段器件技术的发展尚处于起步阶段。尤其是片上光子集成还未形成功能完善的有源、无源器件体系。硅光依旧是光子集成最优潜力的技术路线, 但受制于材料本身性质的制约, 随着工艺的不断改善, 发展多材料融合的异质异构集成是未来的发展方向之一。

参考文献:

[1] Li Z, Heidt A, Simakov N, et al. Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800-2050 nm window [J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26450-26455.

[2] Roberts P, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.

[3] Petrovich M, Poletti F, Wooler J P, et al. Demonstration of amplified data transmission at 2 microm in a low-loss wide bandwidth hollow core photonic bandgap fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28559-28569.

[4] Shen W, Du J, Sun L, et al. 100-Gbps 100-m hollow-core fiber optical interconnection at 2-micron waveband by PS-DMT [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition, 2020: 1.

[5] Liu Z, Chen Y, Li Z, et al. High-capacity directly modulated optical transmitter for 2- μm spectral region [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(7): 1373-1379.

[6] Xu K, Sun L, Xie Y, et al. Transmission of IM/DD signals at 2 μm wavelength using PAM and CAP [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1-7.

[7] Shen W, Du J, Wang C, et al. Single lane 90-Gbps optical interconnection at 2-micron waveband [C]//Optoelectronics and Communications Conference, 2019: 3-6.

[8] Shen W, Du J, Sun L, et al. Low-latency and high-speed hollow-core fiber optical interconnection at 2-micron waveband [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 3874-3882.

[9] Gu Y, Zhang Y, Cao Y, et al. 2.4 μm InP-based antimony-free triangular quantum well lasers in continuous-wave operation above room temperature [J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7: 032701.

[10] Wang R, Sprengel S, Malik A, et al. Heterogeneously integrated III-V-on-silicon 2.3 μm distributed feedback lasers based on a type-II active region [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109: 221111.

[11] Kiani K, Frankis H, Mateman R, et al. Thulium-doped tellurium oxide microring lasers integrated on a low-loss silicon nitride platform [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(11): 3656-

- 3665.
- [12] Li N, Magden E, Su Z, et al. Broadband 2- μm emission on silicon chips: Monolithically integrated Holmium lasers [J]. *Optics Express*, 2015, 26(3): 2220-2230.
- [13] Latawiec P, Venkataraman V, Burek J, et al. On-chip diamond Raman laser [J]. *Optica*, 2015, 2(11): 924-928.
- [14] Volet N, Spott A, Stanton J, et al. Semiconductor optical amplifiers at 2.0- μm wavelength on silicon [J]. *Laser Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1600165.
- [15] Kiani K, Frankis H, Mateman R, et al. Thulium-doped tellurium oxide waveguide amplifier with 7.6 dB net gain on a silicon nitride chip [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5788-5791.
- [16] Wang R, Sprengel S, Muneeb M, et al. 2 μm wavelength range InP-based type-II quantum well photodiodes heterogeneously integrated on silicon photonic integrated circuits [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26834-26841.
- [17] Nedeljkovic M, Soref R, Mashanovich G. Free-carrier electrorefraction and electroabsorption modulation predictions for silicon over the 1-14 μm infrared wavelength range [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(6): 1171-1180.
- [18] Li D, Liu Y, Song Q, et al. Millimeter-long silicon photonic antenna for optical phased arrays at 2- μm wavelength band [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 1-7.
- [19] Van Camp M A, Assefa S, Gill D, et al. Demonstration of electrooptic modulation at 2165 nm using a silicon Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28009-28016.
- [20] Cao W, Hagan D, Thomson D, et al. High-speed silicon modulators for the 2 μm wavelength band [J]. *Optica*, 2018, 5(9): 1055-1062.
- [21] Li W, Li M, Zhang H, et al. 50 Gbit/s silicon modulator operated at 1950 nm [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition, 2020: 4.
- [22] Wang X, Shen W, Li W, et al. High-speed silicon photonic Mach-Zehnder modulator at 2 μm [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 535-540.
- [23] Shen W, Zhou G, Du J, et al. High-speed silicon micro-ring modulator at 2- μm waveband [C]//Optoelectronics and Communications Conference, 2021: 7.
- [24] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages [J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [25] Pan B, Hu J, Huang Y, et al. Demonstration of high-speed thin-film lithium-niobate-on-insulator optical modulators at the 2-microm wavelength [J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 17710-17717.
- [26] Anthony R, Hagan D, Genuth-Okon D, et al. Extended wavelength responsivity of a Germanium photodetector integrated with a silicon waveguide exploiting the indirect transition [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(2): 1-7.
- [27] Ackert J, Thomson D, Shen L, et al. High-speed detection at two micrometres with monolithic silicon photodiodes [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(6): 393-396.
- [28] Xu S, Wang W, Huang Y, et al. High-speed photo detection at two-micron-wavelength: technology enablement by GeSn/Ge multiple-quantum-well photodiode on 300 mm Si substrate [J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5798-5813.
- [29] Tossoun B, Zang J, Addamane S, et al. InP-based waveguide-integrated photodiodes with InGaAs/GaAsSb type-II quantum wells and 10-GHz bandwidth at 2 μm wavelength [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(20): 4981-4987.
- [30] Yin Y, Cao R, Guo J, et al. High-speed and high-responsivity hybrid silicon/Black-Phosphorus waveguide photodetectors at 2 μm [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13: 1900032.
- [31] Guo J, Li J, Liu C, et al. High-performance silicon-graphene hybrid plasmonic waveguide photodetectors beyond 1.55 μm [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(29): 1-11.
- [32] Wun J, Wang Y, Chen Y, et al. GaSb-based p-i-n photodiodes with partially depleted absorbers for high-speed and high-power performance at 2.5 μm wavelength [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(7): 2796-2801.
- [33] Tossoun B, Stephens R, Wang Y, et al. High-speed InP-based p-i-n photodiodes with InGaAs/GaAsSb type-II quantum wells [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(4): 399-402.
- [34] Chen Y, Xie Z, Huang J, et al. High-speed uni-traveling carrier photodiode for 2 μm wavelength application [J]. *Optica*, 2019, 6(7): 884-889.
- [35] McIntyre R. Multiplication noise in uniform avalanche diodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1966, 13(1): 164-168.
- [36] People R, Bean J. Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer heterostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 47(3): 322-324.
- [37] Zhou H, Xu S, Lin Y, et al. High-efficiency GeSn/Ge multiple-quantum-well photodetectors with photon-trapping microstructures operating at 2 microm [J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10280-10293.
- [38] Ma H, Yang H, Tang B, et al. Passive devices at 2 μm wavelength on 200 mm CMOS-compatible silicon photonics

- platform [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(7): 071301.
- [39] Li J, Liu Y, Meng Y, et al. 2 μm wavelength grating coupler, bent waveguide, and tunable microring on silicon photonic MPW [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(5): 471-474.
- [40] Zhang L, Zhang W, Wang X, et al. Investigation of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ photonic crystal slab waveguides with slow light at infrared wavelength [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1438-1443.
- [41] Shen W, Zeng P, Yang Z, et al. Chalcogenide glass photonic integration for improved 2 μm optical interconnection [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1484-1490.
- [42] Muratsubaki T, Fujisawa T, Sawada Y, et al. Fabrication-tolerant four-mode waveguide crossing based on PhC-like subwavelength structures at 2 μm [C]//Advanced Photonics Congress, 2021: 3.
- [43] Ruan Z, Shen L, Zheng S, et al. Subwavelength grating slot (SWG) waveguide at 2 μm for chip-scale data transmission [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(5): 865-871.
- [44] Lamy M, Finot C, Parriaux A, et al. Si-rich silicon-nitride waveguides for optical transmissions and towards wavelength conversion around 2 μm [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(19): 5165-5169.
- [45] Li J, Liu L, Sun W, et al. The 2- μm fully-etched silicon grating coupler [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2017.
- [46] Wang Z, Liu Y, Wang S, et al. Ultra-compact and broadband 3-dB power splitter based on subwavelength grating at 2- μm [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition, 2021: 5.
- [47] Xie H, Liu Y, Sun W, et al. Inversely designed 1×4 power splitter with arbitrary ratios at 2- μm spectral band [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 1-6.
- [48] Stanton E, Volet N, Bowers J. Silicon arrayed waveguide gratings at 2.0- μm wavelength characterized with an on-chip resonator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1135-1138.
- [49] Liu Y, Li Z, Li D, et al. Thermo-optic tunable silicon arrayed waveguide grating at 2- μm wavelength band [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 1-8.
- [50] Liu Y, Wang X, Yao Y, et al. Silicon photonic arrayed waveguide grating with 64 channels for the 2 μm spectral range [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(5): 1186-1189.
- [51] Zhang H, Gleeson M, Ye N, et al. Dense WDM transmission at 2 μm enabled by an arrayed waveguide grating [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3308-3311.
- [52] Huang M, Zheng S, Long Y, et al. Experimental demonstration of 2- μm on-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode (de) multiplexer [C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition, 2018: 6.
- [53] Zheng S, Huang M, Cao X, et al. Silicon-based four-mode division multiplexing for chip-scale optical data transmission in the 2 μm waveband [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1030-1035.
- [54] Zheng S, Huang M, Cao X, et al. Demonstration of 2 μm on-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode (de)multiplexer [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2018: 5.
- [55] Liu D, Wu H, Dai D. Silicon multimode waveguide grating filter at 2 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2217-2222.
- [56] Shen L, Huang M, Zheng S, et al. High-performance silicon 2×2 thermo-optic switch for the 2 μm wavelength band [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-6.
- [57] Yu T, Liu Y, Li Z, et al. Integrated thermo-optic switch for 2 μm spectral band [C]//The International Photonics and Optoelectronics Meeting, 2019: 4.
- [58] Xu J, Li X, Qiao Z, et al. $1 \times N$ ($N=2, 8$) silicon selector switch for prospective technologies at the 2 μm waveband [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(18): 1127-1130.
- [59] Zhong C, Ma H, Sun C, et al. Fast thermo-optical modulators with doped-silicon heaters operating at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23508-23516.