

硫系玻璃集成光子器件综述 (特邀)

杨 振, 王栎津, 靳慧敏, 王志渊, 徐培鹏*, 张 巍, 陈伟伟, 戴世勋

(宁波大学 信息科学与工程学院 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 硫系玻璃具有超宽的红外透过光谱范围、较高的线性折射率、极高的光学非线性和超快的非线性响应, 近年来在集成光子器件研究领域备受关注。首先回顾了硫系玻璃集成光波导的制备, 综述了硫系集成光子器件在红外传感和高性能非线性应用方面取得的进展, 然后介绍了硫系相变光子器件在光开关、光存储和光计算等方面的前沿进展, 最后对目前硫系玻璃光子器件研究存在的问题进行了归纳, 并对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 硫系玻璃; 集成光子器件; 红外传感; 非线性效应; 相变材料

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220152

Review of chalcogenide glass integrated photonic devices (*Invited*)

Yang Zhen, Wang Yuefeng, Jin Huimin, Wang Zhiyuan, Xu Peipeng*, Zhang Wei, Chen Weiwei, Dai Shixun

(Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In recent years, chalcogenide glasses have attracted much attention in the field of integrated photonic devices because of their ultra-wide infrared transmission spectrum, high linear refractive index, extremely high optical nonlinearity, and ultrafast nonlinear response. Firstly, the fabrication of chalcogenide glass integrated optical waveguides was reviewed, the progress of chalcogenide integrated photonic devices in infrared sensing and high-performance nonlinear applications was summarized. Then, the chalcogenide phase-change photonic devices in optical switching, optical storage, and optical computing were introduced. Finally, the current problems in chalcogenide glass photonic devices were summarized, and the future research directions were prospected.

Key words: chalcogenide glass; integrated photonic devices; infrared sensing; nonlinear effect; phase change materials

收稿日期: 2022-03-08; 修订日期: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金 (61875099); 国家重点研发计划 (2021 YFB2801300)

作者简介: 杨振, 男, 博士生, 主要从事硫系光波导的制备及非线性应用等方面的研究。

通讯作者: 徐培鹏, 男, 副教授, 博士, 主要从事硫系玻璃集成光子器件及芯片方面的研究。

0 引言

1969 年, S.E. Miller 提出了集成光学回路 (Optical Integrated Circuits) 的概念, 即利用集成电路的微加工技术, 在单片衬底上实现各种光学元器件的集成^[1]。类似于集成电路的概念, 集成光学的主旨是实现光学器件的薄膜化、微型化和集成化, 具有高集成度、大带宽以及低能耗的特点。相比于传统的光学系统, 集成光学可以在更小尺寸的波导上灵活地进行光信号的处理和计算, 并在光束对准、封装等方面具有传统器件不可比拟的优势, 可以提高系统的稳定性和可靠性, 同时也可以降低整体能耗和成本^[1-5]。

目前, 常用的用于实现光子集成芯片的材料平台主要包括: 铌酸锂薄膜 (LNOI)^[6]、聚合物材料^[7]、二氧化硅^[8]、III-V 族半导体材料^[9]、硅基绝缘体上硅 (Silicon on Insulator, SOI)^[10] 等。铌酸锂具有非常好的电光调制特性, 因此非常适合研制高速光调制^[11]、光开关、光波长转换以及光参量振荡等功能器件, 但是其存在材料昂贵和制备工艺复杂的问题, 大规模生产成本较高。二氧化硅波导和聚合物波导在早期光通信器件中得到了广泛应用。聚合物材料具有工艺简单和价格低廉的优点, 也被用于制作高速光调制器和光开关, 但通常稳定性较差且寿命较短, 不利于器件的稳定性^[12]; 二氧化硅平面光波导技术具有传输损耗低、工艺容差大且易与光纤耦合的优良特性, 易实现模场匹配以及器件的制作^[13]。由于较小的波导折射率差, 基于这两个平台的器件尺寸往往比较大, 集成度较低。III-V 族化合物材料作为一种直接带隙半导体, 是实现激光器的重要平台之一, 然而, 其原材料及工艺加工的成本都较高^[14]。SOI 材料平台具有 CMOS 工艺兼容、折射率高等显著优势, 然而硅是间接带隙半导体, 很难在硅上直接实现激光器等有源器件, 硅基窄的禁带宽度 (1.1 eV) 使得硅在近红外和中红外波段具有显著的双光子和三光子吸收, 限制了其在高功率泵浦时的非线性应用^[15]。尽管这些材料在光、热、电、机械延展等性能上各有所长, 可以满足不同场景不同器件的需求, 在实际的应用过程中, 仍然需要开发低成本、易集成的光子材料平台来满足各种功能性器件的大规模集成。

硫系玻璃材料是一种主要由元素周期表 VIA 族

中的一个或多个硫元素 (硫 (S)、硒 (Se)、碲 (Te)), 并与其他元素 (如: 砷 (As)、锗 (Ge)、锑 (Sb)、镓 (Ga) 等) 构成的非晶态玻璃。与上述材料平台相比, 硫系玻璃具有宽红外透过范围、高材料非线性、低双光子吸收以及在光波导中的强光场限制和色散调控性质, 并具有独特的相变特性。同时, 硫系玻璃的非晶态特性使得它们仅需通过低成本的沉积技术 (如: 蒸镀和溅射) 就可以单片集成在任意衬底平台, 无需复杂的晶片键合工艺就可以实现异质异构集成器件, 有利于低成本大批量生产, 而且可以进一步通过退火等手段消除薄膜内部的应力和缺陷, 使其在集成光子器件研究中极具吸引力^[16-18]。

文中从硫系玻璃光波导的制备研究出发, 介绍了硫系波导器件在红外传感、超连续光谱产生和受激布里渊效应等方面的应用, 并综述了硫系相变集成光子器件在光开关、光调制和光存储等方面的研究进展。

1 硫系玻璃光波导的制备

一直以来, 低损耗硫系玻璃光波导的制备都是硫系集成光子器件的研究重点。研究人员开发了多种制备光波导的方法。主要有: 湿法刻蚀^[19]、干法刻蚀^[20]、热压印^[21]、剥离法^[22] 和激光直写^[23] 等。其中, 在波导制备中利用湿法刻蚀技术很难控制波导的尺寸和形状, 同时各向同性腐蚀导致的严重低切现象等问题也较难控制, 且硫系玻璃在碱性溶液中易发生腐蚀, 增加了波导侧壁和表面的粗糙程度。剥离技术相对简单操作, 但是利用此法制备的波导同样存在侧壁相对粗糙的问题, 因此没有被广泛采用。热压印技术在制备过程需要一定的高温、高压状态 (即高于玻璃的转化温度), 因此温度的不稳定会导致薄膜出现析晶的现象, 由此制备的光波导性能就会受到严重的影响, 同时也会存在压印后脱模困难等问题。激光直写技术在制备过程中会因激光输出功率的波动而导致难以获得理想尺寸和形貌的光波导, 提高光子器件的集成度有限。为了更好地解决这些问题, 研究人员采用干法刻蚀, 通过控制波导芯层和光刻胶的刻蚀选择比, 同时优化获得垂直的波导侧壁和良好的波导形貌, 从而提高器件加工的精度, 有助于提高器件的集成度。目前硫系光波导的干法刻蚀大多采用电感耦合等离子体刻蚀。国内外科研团队对硫系光波导的

研究主要包括: 常见的二元体系 $\text{As}_2\text{S}(\text{Se})_3$ 波导、三元体系中的 $\text{GeAsS}(\text{Se})$ 和 $\text{GeSbS}(\text{Se})$ 波导以及部分 Te 基硫系波导。

2007 年, Madden 等在 As_2S_3 薄膜上利用电感耦合等离子体反应离子刻蚀技术制备了长度为 22.5 cm、截面为 $4\ \mu\text{m}\times 2.6\ \mu\text{m}$ 的蛇形弯曲脊型波导(如图 1(a)所示), 并在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处获得传输损耗为 $0.05\ \text{dB}/\text{cm}^{[24]}$ 。2010 年, Hu 等通过对 As_2S_3 波导施加回流处理, 从而降低波导侧壁粗糙度并减小波导的辐射损耗, 使得 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处波导的传输损耗在退火后减小到原来的 50%^[25], 如图 1(b) 所示。

近年来, Shi 等致力于研究利用成熟的硅光 CMOS 工艺得到硅波导及光滑的二氧化硅微槽结构, 然后在二氧化硅微槽结构中沉积 $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ 薄膜从而形成波导, 通过进一步对 $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ 薄膜进行高温退火, 使微槽中的薄膜收缩形成侧壁光滑的保角波导, 大幅降低波导侧壁带来的辐射损耗, 最终获得了该波导在

$1.55\ \mu\text{m}$ 波长处的传输损耗分别为 $0.7\ \text{dB}/\text{cm}$ 和 $0.08\ \text{dB}/\text{cm}^{[26-27]}$, 如图 1(c) 和 (d) 所示。2020 年, Kim 等利用在硅基上热氧化获得二氧化硅薄膜, 并通过曝光刻蚀获得二氧化硅波导结构, 最后在该结构表面通过热蒸发沉积 As_2S_3 薄膜, 获得了 Q 值高达 1.44×10^7 的硫系微环谐振腔, 这是迄今平面硫系光器件中报道的最高 Q 值, 相应的波导在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处的传输损耗小于 $0.03\ \text{dB}/\text{cm}^{[28-29]}$, 如图 1(e) 所示。值得一提的是, 上述通过在二氧化硅微槽结构上沉积获得硫系波导的模板化制备方法可以避免对硫系玻璃的直接刻蚀, 从而获得高品质波导微腔器件, 然而其热处理过程包含复杂的动力学过程, 如扁平化、成核、回流和生长等过程, 因此其波导结构尺寸难以精确控制, 难以满足需要精细色散调控的高性能非线性应用。2021 年, Zhang 等提出了一种原位光诱导退火方法来提高 As_2S_3 薄膜的稳定性和鲁棒性, 并在基于上述薄膜的波导制备工艺中引入聚合物热固化退火, 制

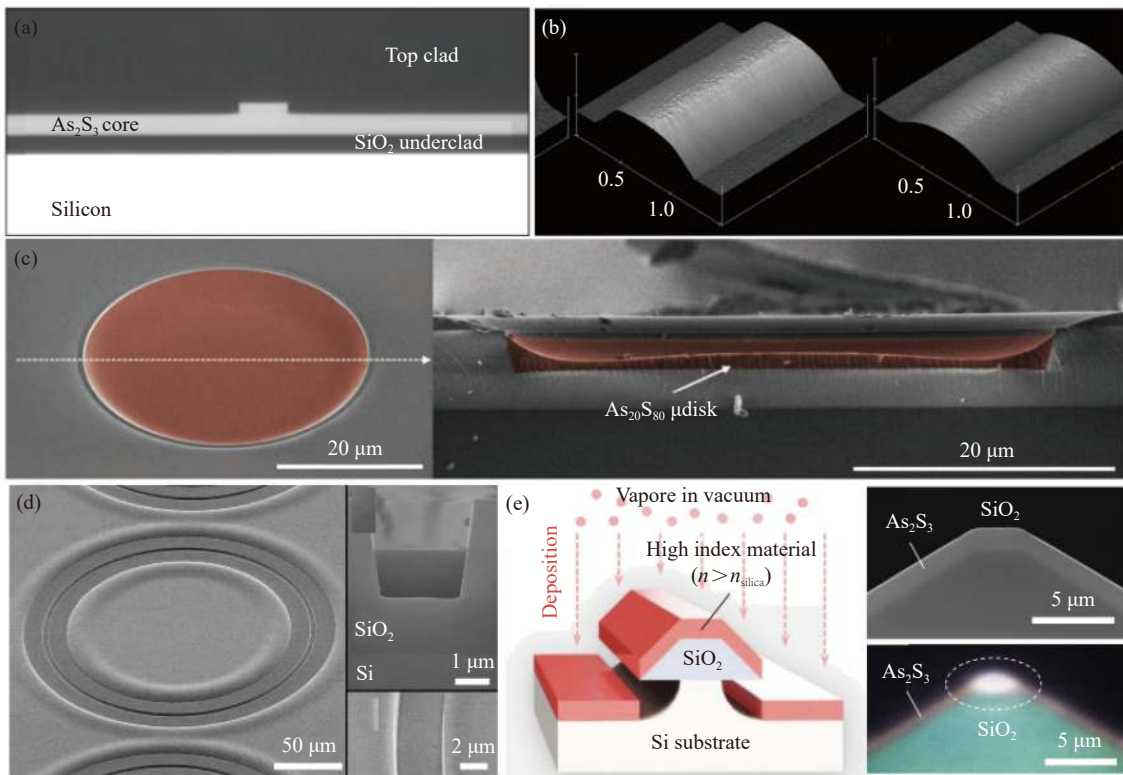


图 1 (a) $4\ \mu\text{m}\times 2.6\ \mu\text{m}$ 的 As_2S_3 蛇形脊型波导的光学显微镜图^[24]; (b) As_2S_3 波导在退火后波导形貌的 AFM 图^[25]; (c) $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ 微盘谐振腔的形貌和截面图^[26]; (d) $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ 微环谐振腔的表面和截面图^[27]; (e) SiO_2 平台结构上沉积 As_2S_3 波导芯层以及波导截面的 SEM 图^[28]

Fig.1 (a) Optical micrograph of $4\ \mu\text{m}\times 2.6\ \mu\text{m}$ As_2S_3 snakes strip waveguide^[24]; (b) AFM picture of As_2S_3 waveguide sidewall roughness after thermal annealing^[25]; (c) Scanning Electron Microscopy (SEM) and cross-section of $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ disk resonator^[26]; (d) SEM and cross-section of $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ microring resonator^[27]; (e) Depositing the As_2S_3 core material on the SiO_2 platform structure, and SEM of cleaved cross-section of waveguide^[28]

备得到了截面尺寸为 2 000 nm×850 nm 的 As₂S₃ 波导,其传输损耗为 0.1 dB/cm^[30]。

为提高 As₂S₃ 和 As₂Se₃ 材料结构的稳定性,研究人员在二元结构中加入 Ge 元素,依靠其会在硫系玻璃网络结构中与其他元素成四配位的形式存在,可以提高硫系材料的结构稳定性以及增加玻璃的硬度和强度等机械性能。2010 年,Gai 等人通过设计亚微米结构尺寸(截面为 630 nm×500 nm)的 Ge_{11.5}As₂₄Se_{64.5} 脊型波导,并且在 1.55 μm 波长处获得了 136 W⁻¹m⁻¹ 的高非线性系数和 2.6 dB/cm 的传输损耗^[31]。2012 年,Gai 等又制备了偏振无关(截面为 580 nm×580 nm)的 Ge_{11.5}As₂₄Se_{64.5} 纳米线波导,当输入光为 TM 和 TE 模时,其波导在 1.55 μm 波长处的损耗分别为 1.65 dB/cm 和 2.2 dB/cm^[32]。2020 年,Li 等人利用等离子体刻蚀加工得到了 Ge_{11.5}As₂₄Se_{64.5} 微盘谐振腔,在 1.54 μm 波长处获得了高达 1.1×10⁶ 的负载 Q 值,如图 2(a) 所示^[33]。

大多数科研团队采用含 As 元素硫系玻璃进行光波导制备研究,少部分科研团队尝试用 Sb 元素代替有毒的 As 元素,即在 GeSbSe 和 GeSbS 等硫系玻璃基质中开展光波导制备研究。2008 年,美国麻省理工大学的 Hu 等利用 CHF₃ 和 SF₆ 刻蚀气体制备了 3 μm 和 4 μm 宽的 Ge₂₃Sb₇S₇₀ 波导,并获得了在 1.55 μm 波长处 3~5 dB/cm 的传输损耗^[34]。2016 年,Hu 等进一步优化了波导的制备工艺,利用氟基等离子体刻蚀制备了低损耗的 Ge₂₃Sb₇S₇₀ 微环谐振腔和微盘谐振腔,其在 1.53 μm 和 1.58 μm 波长处的 Q 值分别为 7.5×10⁵ 和 1.2×10⁶,并由微环 Q 值计算得到该亚波长尺寸波导传输损耗仅为 0.5 dB/cm,这是当时三元体系硫系玻璃光子器件中的最低损耗^[35]。2021 年,中山大学的 Li 等利用优化后的等离子体刻蚀工艺进一步降低了 Ge₂₅Sb₁₀S₆₅ 硫系波导损耗,并在 1.55 μm 波长处获得了 2.2×10⁶ 的超高 Q 值,如图 2(b) 所示^[36]。

2016 年,Krogstad 等在高折射率 Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ 硫系玻璃(n~2.66)平台上利用标准的紫外光刻和电子束光刻分别制备了 2 000 nm×90 nm 和 700 nm×340 nm 的单模脊型波导,并在 1.53 μm 波长处得到了 TE 模式下 4.0 dB/cm 的传输损耗和 TM 模式下 6.1 dB/cm 的传输损耗,同时获得了波导非线性系数 γ 为 6 W⁻¹m⁻¹ 和材料非线性因子 n₂/βλ 为 2.3^[20]。2018 年,厦门大学

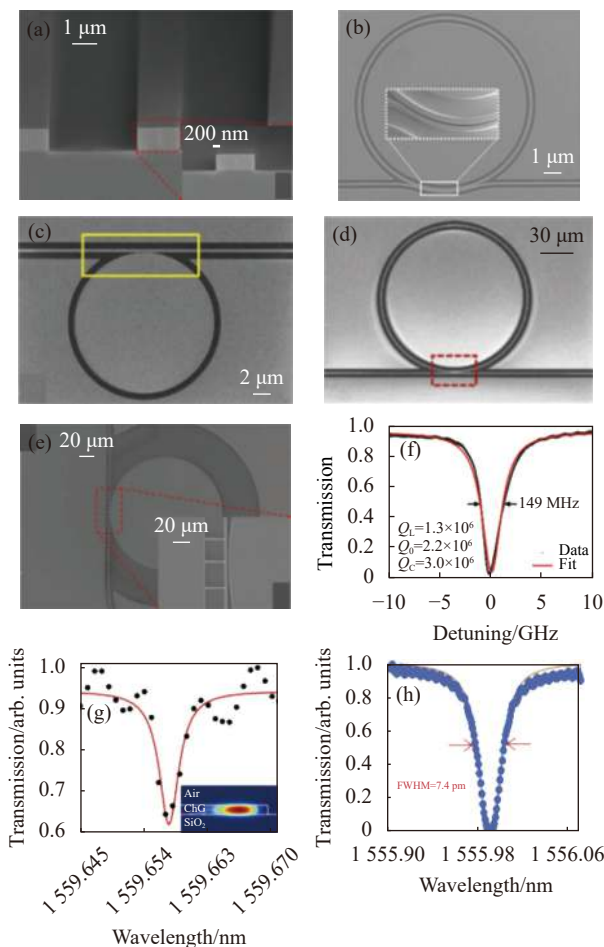


图 2 (a) GeAsSe 波导的截面 SEM 图^[33]; (b) GeSbS 微环谐振腔的电子显微镜图^[36]; (c) Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ 微盘谐振腔的 SEM 图^[37]; (d) Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ 微环的 SEM 图^[38]; (e) 悬挂型 GeAsSe 微盘谐振器的俯视 SEM 图^[33]; (f) 谐振峰的洛伦兹拟合曲线^[36]; (g) 在 1559.657 nm 处的谐振峰的洛伦兹拟合曲线^[37]; (h) 谐振峰的洛伦兹拟合曲线^[38]

Fig.2 (a) SEM cross-sectional view image of GeAsSe waveguide^[33]; (b) SEM image of a GeSbS microresonator^[36]; (c) SEM image of a Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ microdisk resonator^[37]; (d) SEM image of a Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ microring^[38]; (e) SEM top-view image of a suspended GeAsSe microdisk resonator^[33]; (f) Lorentzian fit to the resonance dip^[36]; (g) Lorentzian fit to the resonance dip at 1559.657 nm^[37]; (h) Lorentzian fit to the resonance dip^[38]

的 Luo 等制备了 940 nm×400 nm 的 Ge₂₂Sb₁₈Se₆₀ 脊型波导,获得了 1.55 μm 处的传输损耗为 4.0 dB/cm,并且利用中心波长 1560 nm、重复频率 8.1 MHz、脉冲宽度 800 fs 的激光源泵浦长度 2.1 cm 的波导,产生了 1.2~2.4 μm 的宽带超连续谱^[39]。2019 年,PARK 等对刻蚀后的 Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ 波导进行退火处理,在其玻璃

转化温度以上实现热回流,波导在 1.55 μm 波长处的传输损耗从 2.5 dB/cm 降至 1.0 dB/cm,但是波导形貌严重变形,使得波导的色散调控变得困难,不利于光学非线性应用^[40]。2021 年,宁波大学的 Xu 等制备了 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 硫系微盘和微环谐振腔,在 1.55 μm 波长附近分别获得了 5×10^5 和 4.1×10^5 的高 Q 值,如图 2(c)、

(d) 所示,得益于高折射率硫系波导带来的亚微米尺寸光场约束,其非线性系数 γ 高达 $110 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ ^[37-38],使得亚微米约束的单模 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 波导在光学非线性应用方面极具潜力。表 1 列出了目前主要的几种 1.55 μm 工作波段硫系光波导的最新研究进展。

表 1 目前几种典型的 1.55 μm 工作波段硫系光波导

Tab.1 Current several typical chalcogenide waveguides at 1.55 μm

Materials	Refractive index	Types of waveguides	Dimension/ μm^2	Loss/dB $\cdot\text{cm}^{-1}$	Reference
As_2S_3	2.43	Ring	10 \times 1.3	0.03	[28]
As_2Se_3	2.81	Waveguide	6.0 \times 1.9	<0.78	[41-42]
$\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{S}_{64.5}$	2.30	Waveguide	1.55 \times 0.7	0.25	[43-44]
$\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$	2.55	Waveguide	2.0 \times 1.0	0.48	[33]
$\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$	2.22	Ring	0.75 \times 0.63	0.84	[45]
$\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$	2.2	Ring	2.4 \times 0.8	0.19	[46]
$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	2.50	Waveguide	0.75 \times 0.33	1.0	[40]
$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	2.80	Ring	0.8 \times 0.3	1.3	[38]

随着硫系玻璃集成光波导制备技术的愈加成熟,研究人员同时也开展了中红外波段(2~20 μm)的硫系玻璃集成光子器件研究工作。2012 年,澳大利亚国立大学的 Gai 等制备了长度为 21 cm、截面为 4.0 $\mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$ 的 As_2S_3 脊型波导,获得了波导在 3.6 μm 波长处的传输损耗为 0.75 dB/cm^[47]。2013 年,麻省理工大学的 Lin 等利用剥离法制备了上下包层为 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 、芯层为 As_2Se_3 的硫系微盘谐振腔,获得了在 5.2 μm 波长处 2×10^5 的高品质因子,相应的传输损耗为 0.7 dB/cm,如图 3(a)、(b) 所示^[22]。同年,澳大利亚国立大学的 Ma 等制备了外包层为 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{S}_{64.5}$ 、芯层为 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 的脊型波导,通过测量获得了 3~

7.4 μm 的中红外波段内的 TE 模式平均损耗低于 0.5 dB/cm,同时在 5 μm 波长处获得了 0.3 dB/cm 的低传输损耗^[48],如图 3(c) 所示。

2015 年, Ma 等又报道了可在 5.2 μm 波长处工作的 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 跑道型微环谐振腔,其弯曲半径为 180 μm ,本征 Q 值达到 1.45×10^5 ,并计算得到传输损耗为 0.84 dB/cm^[49]。表 2 总结了目前几种常见的中红外硫系玻璃集成光波导器件的研究进展。

尽管中红外硫系玻璃集成光波导的研究已经取得了一些进展,但其波导传输损耗还比较高,可进一步利用硫系玻璃的光敏性和较低玻璃转化温度发展波导热回流工艺,从而改善波导侧壁的粗糙度,同

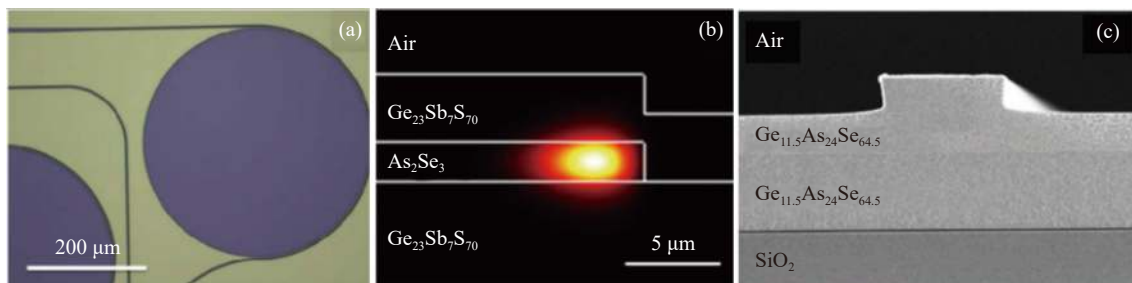


图 3 (a) 半径为 200 μm 的微盘谐振腔; (b) 微盘谐振腔内基模的场强分布^[22]; (c) 波导截面的电子显微镜图^[48]

Fig.3 (a) 200 μm radius microdisk resonator; (b) Simulated field intensity profile of the fundamental mode of the microdisk resonator^[22]; (c) SEM image of the cross-section of waveguide^[48]

表 2 中红外波段硫系玻璃集成光波导器件研究状况

Tab.2 Recent research progress of chalcogenide optical waveguide performance in mid-infrared band

Materials	Types of waveguides	Dimension/ μm^2	Wavelength/ μm	Loss/dB·cm ⁻¹	Reference
As ₂ S ₃	Waveguide	4.0 × 2.5	3.6	0.75	[47]
As ₂ S ₃	Waveguide	1.2 × 0.6	2.0	1.447	[50]
As ₂ Se ₃	Microdisk	2.5 × 1.1	5.2	0.7	[22]
As ₂ Se ₃	Waveguide	3.0 × 1.35	5.27	2 ± 4	[51]
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5}	Waveguide	4.0 × 1.25	5.0	0.3	[48]
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5}	Ring	2.5 × 2.25	5.2	0.84	[49]
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5}	Waveguide	4.0 × 2.2	3.8 - 5.0	~0.6	[52]
Ge ₂₃ Sb ₇ S ₇₀	Microdisk	3.0 × 1.8	5.2	0.21	[53]
Ge ₂₃ Sb ₇ S ₇₀	Waveguide	2.0 × 1.2	3.31	7.0	[54]
Ge ₂₃ Sb ₇ S ₇₀	Waveguide	2.0 × 1.0	3.31	8.0	[55]
Ge ₂₈ Sb ₁₂ Se ₆₀	Waveguide	2.8 × 1.0	4.319	5.1	[56]

时优化波导的刻蚀参数,获得优良的中红外导波性能。也可以考虑从材料的角度出发,对硫系玻璃进行进一步提纯,去除玻璃中可能引起损耗的碳、氢、氧等杂质,降低硫系玻璃的本征损耗,获得低损耗的中红外硫系光波导器件。

2 应用

2.1 红外传感应用

临床医疗、工业勘探、航空航天等精确作业的发展需求对气体探测的精确性与时效性提出了更高要求。近年来,红外光源、光电探测器等元器件的集成化发展也极大地推动了片上红外传感的实用化进程。2~20 μm 波长范围内覆盖了许多痕量气体的特征吸收谱,尤其是 3~5 μm 和 8~14 μm 这两个重要的大气窗口^[39,55]。基于硫系玻璃波导的红外光传感因具有极宽的透明窗口范围(~20 μm)、制备工艺成熟、低损耗、易于集成等优点而备受关注,如检测大气中的微量气体^[57],分析样品中的爆炸性残留物^[58],或非侵入性监测患者的血糖水平^[59]等。

2.1.1 光谱吸收型

光子的能级作为一种非连续的状态,其能量与对应的频率相关。当一定频率范围的光与气体接触时,气体分子选择性吸收与其能级能量差相等的光子,进而分子能级之间的跃迁导致分子振动能级和转动能级的变化。数种带有 O-H、C-H、N-O 等化学键的痕量气体及污染物分子,其在电磁波频谱内均展现出较强的吸收特性。当光源波长覆盖待测痕量气体的特

征吸收谱线时,输出光强会呈现出衰减趋势^[60],通过不同物质分子的选择吸收特性来判断物质的成分及浓度。

2016 年, Han 等通过紫外线曝光及热蒸发工艺制备了一种用于检测甲烷(CH₄)气体的 Ge₂₃Sb₇S₇₀ 螺旋波导,如图 4(a)所示,其最大倏逝场能量占比达 8%。当工作波长为 3.31 μm 时,针对甲烷气体,其检测阈值为 2.5 vol.%^[54]。 Gutierrez-Arroyo 等在硅衬底上通过射频磁控溅射沉积、i 线光刻和氟基反应离子蚀刻制备了基于双层锗铋硒的脊波导,如图 4(b)所示,其芯层和下覆层分别是折射率系数为 2.77 和 2.44 的 Ge_{12.5}Sb₂₅Se_{62.5} 和 Ge_{28.1}Sb_{6.3}Se_{65.6},固有损耗为 2.5 dB/cm,倏逝场能量占比为 5%。当工作波长为 7.7 μm 时,甲烷和一氧化二氮(N₂O)气体的检测阈值分别为 14.2 ppm (1 ppm=10⁻⁶) 和 1.6 ppm^[61]。2017 年, Gutierrez-Arroyo 等设计了一种芯层及下包层折射率系数分别为 2.81 和 2.40 的 (GeSe₂)_{100-x}(Sb₂Se₃)_x 脊波导,倏逝场能量占比为 8%,在固有损耗 1 dB/cm 的情况下,最优长度为 4.3 cm。当工作波长为 4.3 μm 时,对于二氧化碳(CO₂)气体的检测阈值为 268 ppb (1 ppb=10⁻⁹);当工作波长为 3.31 μm 和 7.66 μm 时,对甲烷气体的检测阈值分别为 1.848 ppm 和 781 ppb;当波长为 6.68 μm 时,对甲苯(C₇H₈)溶液的检测阈值为 26 ppb^[62]。2018 年, Mittal 等人提出并制备了 ZnSe 脊波导,如图 4(c)所示,通过结合纸质流体学,在 2.6~3.7 μm 波段范围内测量了六种不同浓度异丙醇(C₃H₈O, IPA)水溶液的波导透射光谱,并与理论模型取得良好的一致性^[63]。

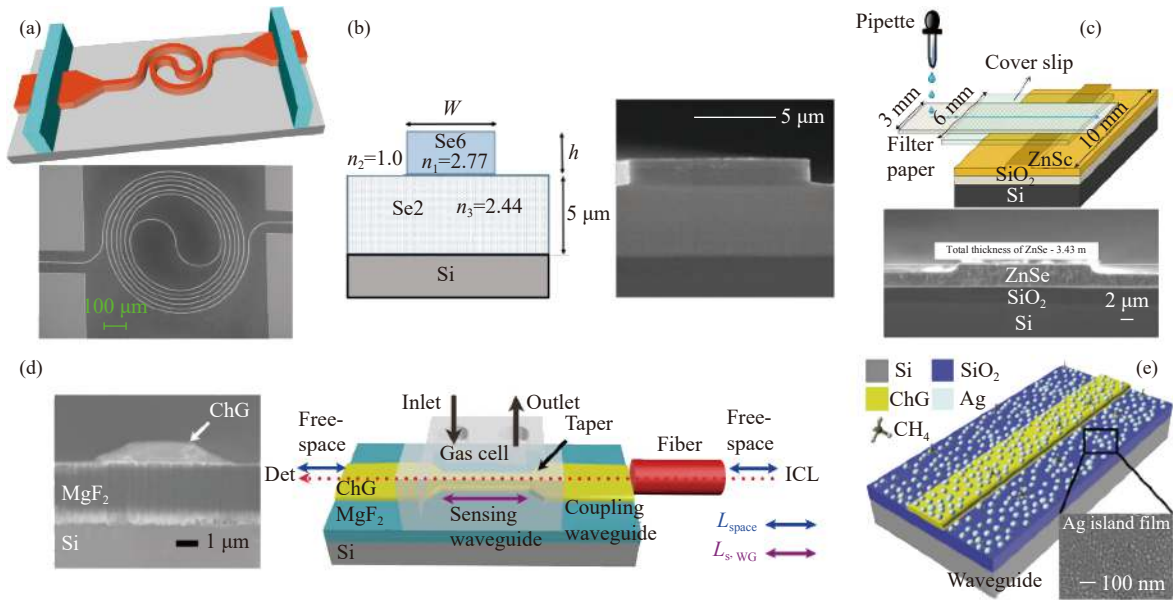


图 4 (a) $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 螺旋波导的示意图和 SEM 图^[54]; (b) 基于两种不同 GeSbSe 材料的脊波导截面图及其 SEM 图^[61]; (c) ZnSe 脊波导示意图和截面 SEM 图^[63]; (d) $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 条波导横截面 SEM 图和 PDMS 气室集成波导传感示意图^[56]; (e) 基于银岛状膜的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 波导传感器的示意图^[64]

Fig.4 (a) Schematic diagram and SEM image of the $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ spiral waveguide^[54]; (b) Cross-sectional view and the corresponding SEM image of the ridge waveguide comprising two different compositions of GeSeSe glasses^[61]; (c) Schematic diagram and cross-sectional SEM image of the the ZnSe rib waveguide^[63]; (d) Cross-sectional SEM image of the $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ strip waveguide and schematic diagram of the waveguide integrated with a PDMS gas cell^[56]; (e) Schematic diagram of the $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ waveguide sensor using the silver island film^[64]

2019 年, Pi 等提出了一种用于检测甲烷气体的 As_2Se_3 悬浮型槽波导。当工作波长为 $3.291 \mu\text{m}$ 时, 倏逝场能量占比可达到 85.77%, 波导损耗为 3 dB/cm, 器件最优长度为 1.45 cm。当最小可探测信噪比为 10 时, 检测阈值低至 1.7 ppm^[65]。2020 年, Zegadi 等分析设计了一种芯层与下包层折射率系数分别为 2.69 和 2.49 的 $(\text{GeSe}_2)_{100-x}(\text{Sb}_2\text{Se}_3)_x$ 槽波导, 倏逝场能量占比为 58%。当工作波长为 $4.3 \mu\text{m}$ 时, 对二氧化碳气体的灵敏度和检测阈值分别为 $35 \text{ nW} \cdot \text{ppm}^{-1}$ 和 0.1 ppm; 当工作波长为 $7.7 \mu\text{m}$ 时, 对甲烷气体的灵敏度和探测阈值分别为 $2.1 \text{ nW} \cdot \text{ppm}^{-1}$ 和 1.6 ppm^[66]。2021 年, Wang 等在硅衬底上提出了一种用于甲烷气体传感的 $\text{GeSbSe}(\text{NBU-IR4})$ 悬浮型狭缝波导。在 $3.0 \sim 4.4 \mu\text{m}$ 波长范围内, 倏逝场能量占比均在 90% 以上。当工作波长为 $3.67 \mu\text{m}$ 时, 倏逝场能量占比、灵敏度和检测阈值分别为 93.81%、0.4578 和 18.17 ppm; 当工作波长为 $3.291 \mu\text{m}$ 时, 倏逝场能量占比、灵敏度和检测阈值分别为 91.98%、7.151 和 1.139 ppm^[67]。Pi 等人采用升空法制备了一种下覆层为 MgF_2 的

$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 矩形波导, 如图 4(d) 所示。通过利用波长调制光谱技术抑制噪声, 从而提高灵敏度。当工作波长为 $4.319 \mu\text{m}$ 时, 对于二氧化碳气体, 在 1 cm 的有效探测路径上, 其检测阈值达到 0.3%^[56]。同年, 该课题组提出并制备了一种基于银岛状膜的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 表面增强型条波导, 如图 4(e) 所示。该结构在 1.8 nm 厚的银岛状膜覆盖下达到性能最优状态。当工作波长为 $3.291 \mu\text{m}$ 时, 对于甲烷气体, 当探测时间为 50.6 s 时, 检测阈值可达 0.61%; 而当探测时间为 0.2 s 时, 检测阈值为 4.11%^[64]。

2.1.2 透射峰偏移型

谐振腔对环境因素的变化极为敏感, 当介质输入或表面分子吸附等原因造成波导倏逝场空间内的折射率改变时, 将引起谐振模式有效折射率的波动, 即发生透射峰偏移现象, 而通过量化偏移量可检测待测介质浓度。

2017 年, Xu 等提出了一种基于 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 的一维光栅型微桥腔, 如图 5(a) 所示, 可实现对折射率实部及虚部的同时探测。当共振波长为 $4.132 \mu\text{m}$

时,灵敏度及品质因子分别可达 2280 nm/RIU 和 10^6 以上^[68]。2019 年, Nalivaiko 等提出了一种基于硫系玻璃的光栅波导传感器。当谐振波长为 0.63 μm 时, 检测阈值可达 1×10^{-5} ^[69]。2021 年, Huang 等提出并制备了一种基于 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 微环结构的光传感, 如图 5(b) 所示。当工作波长为 1.55 μm 时, 波导传输损耗为 4.3 dB/cm, 固有品质因子和消光比分别为 7.74×10^4 和 40 dB。通过检测分析不同浓度的氯化钠 (NaCl) 溶液, 其灵敏度和检测阈值分别为 123 nm/RIU 和 3.24×10^{-4} RIU^[70]。Zhang 等提出并制备了一个 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 槽波导微环谐振结构, 如图 5(c) 所示, 槽区和包层区的倏逝场能量占比分别为 36.3% 和 56.7%, 当工作波长为 1.55 μm 时, 微环谐振器的品质因子为 1×10^4 , 在内径为 60 μm 的情况下, 其灵敏度和检测阈值分别为 471 nm/RIU 和 3.3×10^{-4} RIU^[71]。为了进一步提升传

感性能, 可通过片上集成光源及光电探测器方式改善系统噪声。2018 年, Du 等演示了一种片上超连续谱光源集成光学传感器结构, 如图 6(a) 所示。其中, $\text{Ge}_{22}\text{Sb}_{18}\text{Se}_{60}$ 波导用于宽带超连续谱生成和传感检测, 可实现 1.38~2.05 μm 范围的宽光谱探测^[39]。2019 年, Su 等报道了一种 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 螺旋波导光学传感器集成 PbTe 光电探测器, 如图 6(b) 所示。当工作波长为 3.291 μm 时, 对于甲烷气体, 该集成传感器在 0.078 Hz 的噪声带宽下检测极限为 1.0 vol.%, 可通过改善制备工艺和消除激光功率波动噪声, 将最大灵敏度达到 330 ppmv^[55]。

硫系玻璃由于透明窗口宽、折射率可调、工艺成熟等优点在红外传感方面有着广泛的应用。目前, 关于硫系玻璃波导片上红外传感的研究已有诸多报道, 其中以光谱吸收和谐振偏移为主要研究方向, 通过调

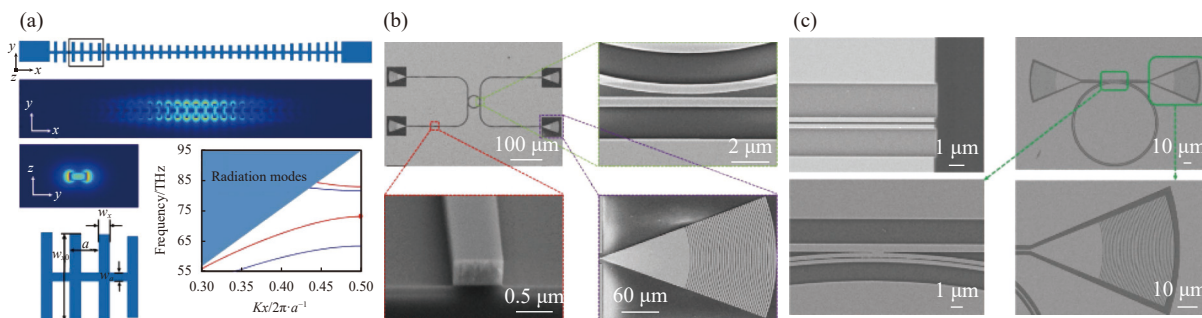


图 5 (a) 基于 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 波导的光栅谐振型传感器原理图、电场分布和能带图^[68]; (b) $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 微环谐振传感器的 SEM 图^[70]; (c) $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 槽型波导及微环谐振传感器的 SEM 图^[71]

Fig.5 (a) Schematic, electric field distribution and band diagram of the $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ grating resonance sensor^[68]; (b) SEM images of the $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ waveguide sensor using micro-ring resonance^[70]; (c) SEM images of the $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ slot waveguide and the $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ slot micro-ring sensor^[71]

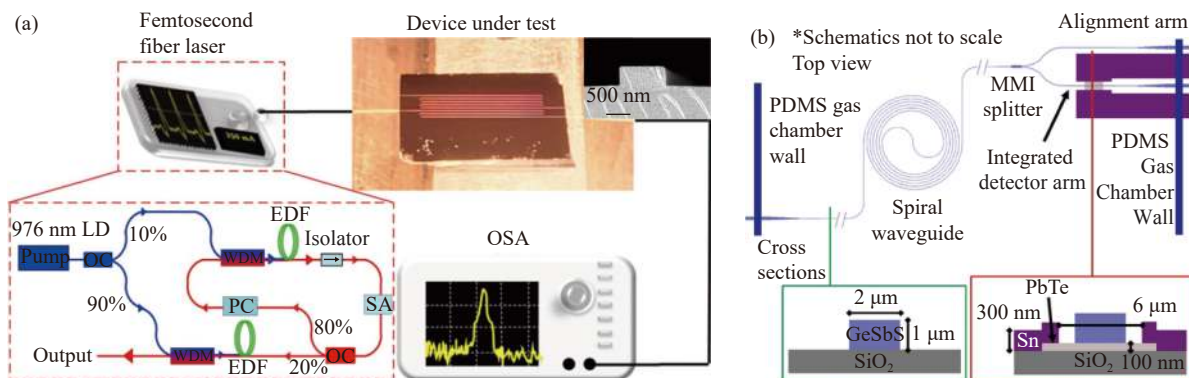


图 6 (a) 片上超连续谱光源集成光传感器的测试示意图^[39]; (b) 螺旋状波导光传感器集成 PbTe 光电探测器示意图和截面图^[55]

Fig.6 (a) Schematic diagram of on-chip SC integrated with optical sensor^[39]; (b) Schematic diagram and cross-sectional view of the optical sensor using spiral waveguide integrated with PbTe photodetector^[55]

节硫系材料成分及设计优化波导结构可以进一步优化灵敏度和检测阈值等传感性能。传感平台中的外置激光源及光电探测器不可避免地引入额外的系统噪声,片上光源及光电探测器的集成化发展将最大化抑制平台噪声,并实现基于光子芯片的小型化红外光谱传感。

2.2 非线性光子器件

2.2.1 超连续光谱产生

超连续光谱(SC谱)是一种具有高相干性、宽光谱范围和高亮度的光谱。SC谱产生的基本机制是在非线性介质中发生自相位调制、级联拉曼散射和四波混频、色散波发射和孤子自频移等非线性效应引起的高阶孤子裂变。随着SC谱技术的强劲发展,一系列基于SC谱光源的新型应用应运而生,如超短脉冲生成,光学相干断层扫描以及精确频率计量、光通信、光谱探测等。由于硫系玻璃的优异非线性特性,人们已经在多种硫系玻璃光纤中实现了SC谱产生。硫系玻璃集成光波导拥有极强的光场约束和灵活的色散调控能力,在SC谱产生方面也引起了研究人员的广泛兴趣。

在近红外SC谱产生方面,2008年,澳大利亚悉尼大学的Eggleton团队和澳洲国立大学的Davies团队合作制备了长6.0 cm、 $2.0\ \mu\text{m}\times 0.87\ \mu\text{m}$ 的 As_2S_3 脊型波导,首次通过色散设计获得了 $+29\ \text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ 的反常色散值和 $10\ \text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$ 的非线性系数,并通过脉宽610 fs、峰值功率68 W的 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的光源泵浦该波导获得了750 nm带宽的SC谱输出^[72]。同年,Beniamin J.Eggleton等在直径为950 nm的纳米线波导中利用峰值功率仅为7.8 W的低阈值泵浦产生了 $1.1\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的SC光谱^[73]。2010年,澳大利亚国立大学的Gai等首先设计了亚微米尺寸的 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 波导,获得了当时硫系光波导中最高的非线性系数 γ 为 $136\ \text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$,并且实现了 $1.2\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的SC谱输出^[31-32]。2012年,通过设计方形截面的偏振无关 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 波导,利用较低的泵浦功率实现了带宽覆盖 $1.1\sim 2.2\ \mu\text{m}$ 的SC谱。2014年,M.R.Karim等在尺寸为 $700\ \text{nm}\times 500\ \text{nm}$ 和 $775\ \text{nm}\times 500\ \text{nm}$ 的波导中分别模拟获得了 $1.2\sim 2.1\ \mu\text{m}$ 以及 $1.2\sim 2.4\ \mu\text{m}$ 的SC光谱输出^[74]。2016年,美国科罗拉多大学的Molly R等在 $730\ \text{nm}\times 340\ \text{nm}$ 单模传输的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 波导

中实现了带宽覆盖250 nm的SC谱^[20]。2020年,南开大学的Shang等在 GeSbS 波导平台上获得了带宽覆盖1300 nm的SC谱,并且实现了对 CCl_4 浓度的探测^[75]。2021年,Duk-Yong Choi等在刻蚀后形貌光滑的二氧化硅波导表面沉积了 As_2S_3 薄膜,获得了超低损耗硫系光波导^[29],利用脉宽135 fs、重复频率100 MHz、中心波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光源泵浦 As_2S_3 波导获得了1.5个倍频程的SC谱展宽,如图7(a)~(c)所示。

在中红外SC谱产生方面,2012年,Gai等利用波长 $3.26\ \mu\text{m}$ 、脉宽7.5 ps的持续脉冲抽运6.6 cm长的 As_2S_3 硫系脊形波导,产生了带宽覆盖 $2.9\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 的中红外SC谱。并且证明通过消除目前限制长波长拓展的包层吸收,其SC谱可以进一步展宽至 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ ^[47]。2013年,Yu等在长度为7 cm、上下包层为 GeAsS 、芯层为 GeAsSe 的脊型波导结构中仿真获得了 $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 以上带宽的SC输出;并且利用中心波长 $5.3\ \mu\text{m}$ 、脉宽150 fs和峰值功率20 mW的光源泵浦厚度为5 mm的硫系玻璃获得了 $2.5\sim 7.5\ \mu\text{m}$ 带宽的平坦SC输出^[76]。2014年,Yu等又利用波长 $4\ \mu\text{m}$ 、脉宽320 fs的持续脉冲抽运1.0 cm长的 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 波导,获得了 $1.8\sim 7.5\ \mu\text{m}$ 波段的宽带且平坦的中红外SC谱^[77]。2016年,Yu等再次采用波长 $4.184\ \mu\text{m}$ 、脉宽330 fs的泵浦光抽运1.8 cm长的 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$,实现了带宽覆盖 $2.0\sim 10.2\ \mu\text{m}$ 的SC谱,是目前在硫系光波导SC谱研究中获得的最大展宽^[52],如图7(d)和(e)所示。2021年,Zhang等在 GeAsSeTe 波导中理论仿真获得了 $2\sim 13\ \mu\text{m}$ 的宽带SC谱输出^[78],由于中红外光源的限制未获得最终实验结果,但说明了基于硫系光波导的SC谱产生可以拓展到更远的中远红外波段。表3列出了基于硫系玻璃光波导的中红外SC谱产生的研究进展。

目前硫系光波导中红外SC谱产生研究主要集中在SC谱的带宽展宽方面,中红外SC谱的相干性、输出功率及应用方面的研究工作相对较少。另一方面,由于Te基硫系玻璃具有硫系材料中最宽的透过范围以及最高的线性折射率和非线性折射率,未来可以选择Te基硫系玻璃作为片上SC谱产生的波导基质,进而获得更宽带的SC产生。同时,硫系玻璃光波导在中红外波段的传输损耗可以通过提高硫系玻璃基质材料的纯度、优化波导的侧壁等粗糙度来得到进一步

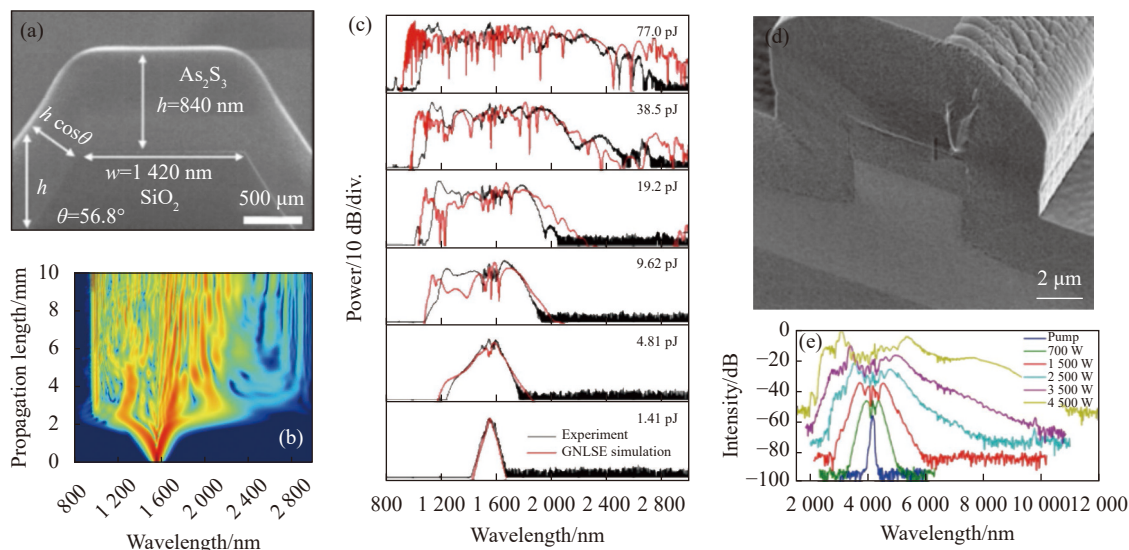


图 7 (a) 波导截面的 SEM 图^[29]; (b) 超连续光谱展宽模拟^[29]; (c) TM 模式的超连续光谱产生的实验结果^[29]; (d) 波导截面的 SEM 图^[52]; (e) 在 4.184 μm 波长的泵浦下, 不同泵浦功率获得的 SC 谱产生^[52]

Fig.7 (a) Typical waveguide cross section under SEM inspection^[29]; (b) The simulation of supercontinuum spectrum broadening^[29]; (c) Experimental results of supercontinuum spectrum generation in TM mode^[29]; (d) Typical waveguide cross section under SEM inspection^[52]; (e) Experimental SC evolution with increasing powers at a pump wavelength of 4.184 μm^[52]

表 3 硫系波导片上中红外 SC 输出的研究报道

Tab.3 Research progress of on-chip mid-infrared SC output in chalcogenide waveguides

Materials	Pump condition	Length/cm	SC spectrum band width/μm	Reference
As ₂ S ₃	3.26 μm/7.5 ps/1.5 MHz	6.6	2.9-4.2	[47]
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5}	5.0 μm/250 fs	7.0	2.5-10	[76]
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5}	4.0 μm/320 fs/21 MHz	1.0	1.8-7.5	[77]
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5}	4.184 μm/330 fs/21 MHz	1.8	2-10	[52]
Ge ₂₀ As ₂₀ Se ₁₅ Te ₄₅	5.8 μm/120 fs	0.5	2-13	[78]

降低; 还可结合硫系玻璃组分可调节的灵活性来提高硫系波导的抗激光损伤性能, 使得硫系光波导 SC 谱光源的带宽、相干性和输出功率等性能不断提高, 具备更强的实用价值。

2.2.2 受激布里渊散射

受激布里渊散射 (SBS) 作为一种常见的非线性光学效应, 描述了介质中光子与声子之间的相互作用引起的强大而灵活的光调控机制。当入射泵浦光功率较高时, 由光波产生的电磁伸缩效应在介质内激发起前向传播的声波, 入射光被声波散射而产生后向传播的光波, 称为 Stokes 波, 其光频率与泵浦光频率相差一个声波频率, 如图 8(a) 所示。

二氧化硅较小的折射率导致其对光模式的限制较弱, 进而声光相互作用过程中得到的布里渊增益系数小, 实现 SBS 的石英光纤长度一般需要拉至千米级

来获取较大的 SBS 增益, 这使得整个实验装置较为复杂, 不利于器件的小型化和集成化。硅材料由于其较小的光弹系数和较差的声学模式约束, 使得硅波导的布里渊增益系数很小, 但近年来通过设计纳米尺寸波导结构产生辐射压力, 并结合电致伸缩力, 使硅波导的 SBS 效应得到了极大的增强^[79-80]。硫系玻璃材料由于其较高的弹光系数 (硅材料的 10 倍) 以及极其优秀的声学模式约束能力, 使得硫系光波导具有较大的 SBS 增益系数, 被广泛用于 SBS 集成光子器件的研究中。

2011 年, Pant 等利用背散射信号和泵浦-探测技术, 在长度为 7 cm、截面为 4 μm×850 nm 的 As₂S₃ 脊形波导中实现了 SBS 效应, 测得的布里渊频移为 7.7 GHz, 布里渊线宽为 34 MHz^[81]。同时, 通过信号光增益谱拟合得到布里渊增益系数为 0.715×10⁻⁹ m/W, 当泵浦功率为 300 mW 时, 获得了 16 dB 的信号光增

益。2013 年, Kabakova 等在长 7 cm、宽 4 μm 的 As_2S_3 脊形波导中得到布里渊增益系数和布里渊频移分别为 $0.7 \times 10^{-9} \text{ m/W}$ 和 $(7.5 \pm 0.2) \text{ GHz}$ 。利用该硫系光波导外接光纤回路构成谐振腔结构, 首次实现了基于硫系光波导的片上窄线宽布里渊激光器, 如图 8(b) 所示, 测量得到的激光线宽比泵浦线宽窄 15 倍, 比布里渊增益带宽窄 300 倍^[82]。

SBS 效应由于线宽极窄、频率稳定等显著优势, 成为实现超窄带微波光子滤波器的最优选择之一。2016 年, 悉尼大学采用 As_2S_3 波导的窄带 SBS 效应实现了一种具有超高抑制比、带宽调谐范围为 33~88 MHz 高频率分辨率的微波光子带阻滤波, 并实现了 1~30 GHz 的频率调谐^[83]。2017 年, Morrison 等利用硅基混合集成方法 (如图 8(c) 所示), 将长 5.8 cm 的 As_2S_3 螺旋波导嵌入硅光波导中, 从而在硅基器件中得到 22.5 dB 的高布里渊增益 (净增益为 18.5 dB); 并进一步利用微环的谐振加强作用, 当微腔的 FSR 等于布里渊频移 SBS 时, 首次实现了平面光

子器件中的布里渊激光出射^[84]。

在过去的十年里, 由于 As_2S_3 硫系玻璃波导的强布里渊相互作用已经实现了众多高性能片上光子器件。然而, As_2S_3 硫系玻璃很容易被氧化, 在器件制作过程中稳定性较差。同时, 由于 As_2S_3 的玻璃化转变温度较低, 采用现有的化学气相沉积 (CVD) 方法难以制备出传输损耗较低的二氧化硅包层 As_2S_3 波导。此外, 基于 As_2S_3 硫系玻璃的光子器件在实际应用中往往会受到 As 毒性的限制。2021 年, 中山大学的 Song 等引入不含毒性元素的 GeSbS 硫系玻璃光子平台, 获得了较大的片上 SBS 增益。该团队在长度为 7 cm、截面为 $2.8 \mu\text{m} \times 850 \text{ nm}$ 的 $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ 硫系螺旋波导中表征了 SBS 特性, 测得布里渊频移和布里渊线宽分别为 7.443 GHz 和 47.8 MHz。由于其较高的布里渊增益系数 ($338 \text{ m}^{-1} \text{ W}^{-1}$), 在泵浦功率为 200 mW 时, 得到信号增益为 17.6 dB^[85]。硫系光波导拥有很高的布里渊增益系数和低损耗特性, 使得硫系光波导平台已经成为开发高性能 SBS 集成器件的理想平台。

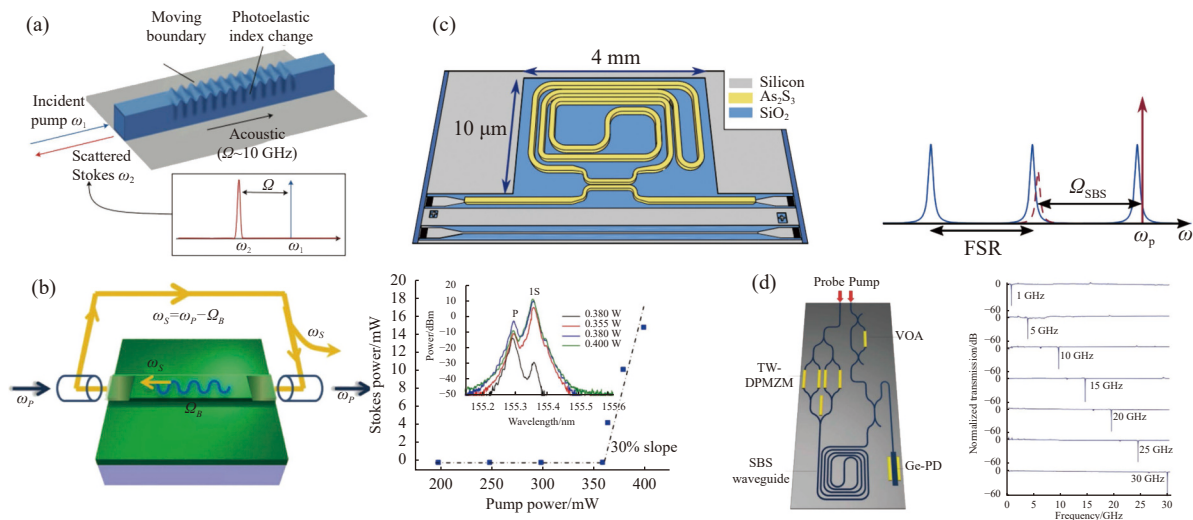


图 8 (a) SBS 的概述: 泵浦波 (ω_1) 从声子 (Ω) 中散射并增强声子, 并产生 Stokes 波 (ω_2), 结果是在距离泵浦的 GHz 处分离出一个狭窄的 Stokes 峰, 该结构显示了后向布里渊散射^[86]; (b) 基于硫系玻璃光子芯片的布里渊激光器原理图^[82]; (c) 硅基混合集成 As_2S_3 螺旋环形谐振腔, 谐振腔中的 SBS 效应^[84]; (d) 基于 SBS 的集成微波光子滤波器, 阻带中心频率调谐^[83]

Fig.8 (a) Overview of SBS: A pump wave (ω_1) scatters from and re-enforces an acoustic phonon (Ω) and is downshifted to a Stokes wave (ω_2), the result is a narrow Stokes peak separated at a distance of GHz from the pump, this configuration shows backward Brillouin scattering^[86]; (b) Schematic of a BL based on photonic chip^[82]; (c) Schematic of the hybrid As_2S_3 ring resonator structure, concept figure for the lasing conditions^[84]; (d) SBS-based integrated microwave photonic filter, stopband center frequency tuning^[83]

2.2.3 受激拉曼散射

受激拉曼散射 (SRS) 是一种重要的非线性光学现象, 指超过某一阈值 (拉曼阈值) 的强泵浦入射光入

射到非线性介质中后, 被称为斯托克斯光的较低频率的成分急剧增加, 泵浦光的能量大部分转换到斯托克斯光的现象。SRS 被认为是一种扩展传统半导体和

稀土掺杂激光光源光谱覆盖的有效方法。基于 SRS 技术的集成 SRS 激光在光学放大、光谱传感、考古学和临床诊断等领域具有潜在的应用。近年来,光子集成拉曼激光器已经在硅^[87]、金刚石^[88]、氮化铝(AIN)^[89]和铌酸锂(LN)^[90]材料平台上被实现。然而在这些材料平台中获得的拉曼增益光谱带宽都比较窄,需要一种可产生宽带拉曼增益的材料平台。硫系玻璃由于具有显著的拉曼和克尔非线性,可透过到中远红外波段范围,同时又具有可忽略的双光子吸收(TPA)和自由载流子吸收(FCA)的特性,更加适合获得具有宽频带的拉曼增益光谱。

2013年,Francis Vanier等制备了半径为20 μm的As₂S₃微球,并且获得了7×10⁷的高品质因子。当泵浦波长为1550 nm时,产生拉曼激光的泵浦功率阈值低至13 μW,同时获得了10.7%的转换效率^[91],如图9(a)、(b)所示。2014年,Francis Vanier等再次在As₂S₃微球中获得了级联拉曼激光的输出。当泵浦波

长为1557 nm和1880 nm时,分别获得了5阶和3阶的受激拉曼散射,而且泵浦阈值低至微瓦量级^[92],如图9(c)~(e)所示。2021年,Alexey V. Andrianov等利用商用C波段窄线宽激光器在As₂S₃微球中泵浦产生了拉曼激光。当泵浦波长在1522~1574 nm范围内调节时,可获得1610~1663 nm的单模可调谐的拉曼激光。在泵浦功率明显超过阈值时,实现了4阶多模级联拉曼激光^[93],如图9(f)所示。同年,中山大学的Zhang等在截面尺寸为2400 nm×800 nm集成的Ge₂₅Sb₁₀S₆₅微环谐振腔中获得了大于10⁶的高Q值,并且利用1550 nm波长的激光源泵浦该微腔,获得该材料的拉曼增益系数为7.37×10⁻¹² m/W,泵浦阈值为3.25 mW^[36],如图9(g)所示。

目前对于在片上集成硫系光波导中产生受激拉曼散射效应的材料还比较单一,主要集中在As₂S₃中,而且产生拉曼激光的波长主要在近红外波段,急需开展2 μm波长以上的拉曼激光的研究和应用。

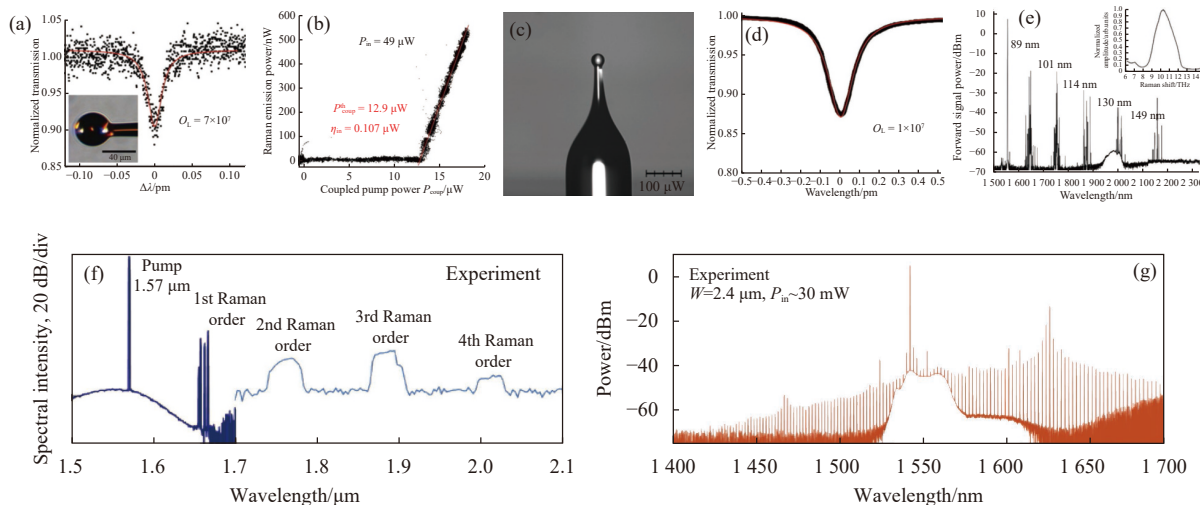


图 9 (a) As₂S₃ 微球谐振峰的洛伦兹拟合曲线^[91]; (b) 拉曼发射功率和耦合泵浦功率的关系^[91]; (c) 典型封装的 As₂S₃ 微球图像^[92]; (d) 封装的 As₂S₃ 微球谐振峰的洛伦兹拟合^[92]; (e) As₂S₃ 微球五阶级联 SRS 发射光谱^[92]; (f) 四级级联拉曼激光实验光谱^[93]; (g) 当泵浦功率增加到 30 mW 时的拉曼测量光谱^[36]

Fig.9 (a) Lorentzian fit to the resonance dip of As₂S₃ microsphere^[91]; (b) Raman emission power versus coupled pump power^[91]; (c) Image of a typical packaged As₂S₃ microsphere^[92]; (d) Lorentzian fit to the resonance dip of typical packaged As₂S₃ microsphere^[92]; (e) Spectrum of a 5 Raman orders cascaded SRS emission of an As₂S₃ microsphere^[92]; (f) Experimental spectrum of four-cascade Raman lasing^[85]; (g) Measured Raman spectrum when increasing the pump power to ~30 mW^[36]

3 硫系相变集成光子器件

3.1 硫系相变集成光开关

类似于电子领域的现场可编程门阵列 (FPGA),

光子信息处理的成功通常需要大规模可重构集成光路,构造可重构集成光路需要低能耗、紧凑和高速的光子器件单元,并具有超低插入损耗和精确控制^[94]。

传统的光子器件调控依赖于微弱、易失的热光效应或电光效应,因此器件尺寸大,能耗高。硫系玻璃相变材料具有非易失性、折射率反差巨大等特点,为小型化、低功耗可重构光子器件的实现提供了一个很有前景的解决方案,近年来受到了广泛关注^[95-101]。

2014 年, Rios 等在集成绝缘体上 Si₃N₄ 平台上设计并实现了基于 GST 薄膜覆盖的跑道环谐振器的光开关^[102]。当输入光为跑道环谐振器的共振波长时,可以根据 GST 的相态实现与跑道环谐振器耦合或隔离。当 GST 为低损耗非晶相时,跑道谐振器的谐振条件保持不变,光通过跑道环谐振器传播时没有受到 GST 薄膜的影响。此时,总线波导的输入光在经过跑道环谐振器时满足临界耦合条件,因此没有功率传输到波导输出(传输“0”)。当相变材料转换到高损耗的晶相时,跑道内传播模式的衰减系数急剧增加,改变了赛道谐振器的谐振条件,因此,总线波导中的非谐振输入光不能再耦合到跑道谐振器并完全传输到总

线波导的输出端口(传输“1”)。

2018 年, Zheng 等通过将硫系相变材料 GST 与硅基微环谐振器集成,在硅光子平台上实现了准连续的非易失性光开关^[103],如图 10(b) 所示。通过将不同长度的硫系相变材料覆盖在硅微环波导上,可以确定微环谐振器的临界耦合条件,从而获得最大的消光比,并通过计算得到单位长度硅基-硫系相变材料混合波导的损耗和波长漂移。对于 GST 的非晶化过程,他们采用单个能量约为 620 pJ 的光脉冲。对于 GST 的晶化过程,使用了一系列能量约为 220 pJ 的光脉冲。通过改变激光脉冲的数量和能量, GST 可以在非晶态和晶态之间可逆切换,实现了消光比约为 33 dB 的准连续的光开关。

2019 年, Xu 等通过将 GST 与非对称定向耦合器集成,在硅光子平台上实现了具有低损耗和大带宽的紧凑非易失性 1×2 和 2×2 光开关^[104],如图 10(c) 所示。对于 2×2 光开关,其开关操作主要依赖于硅波导

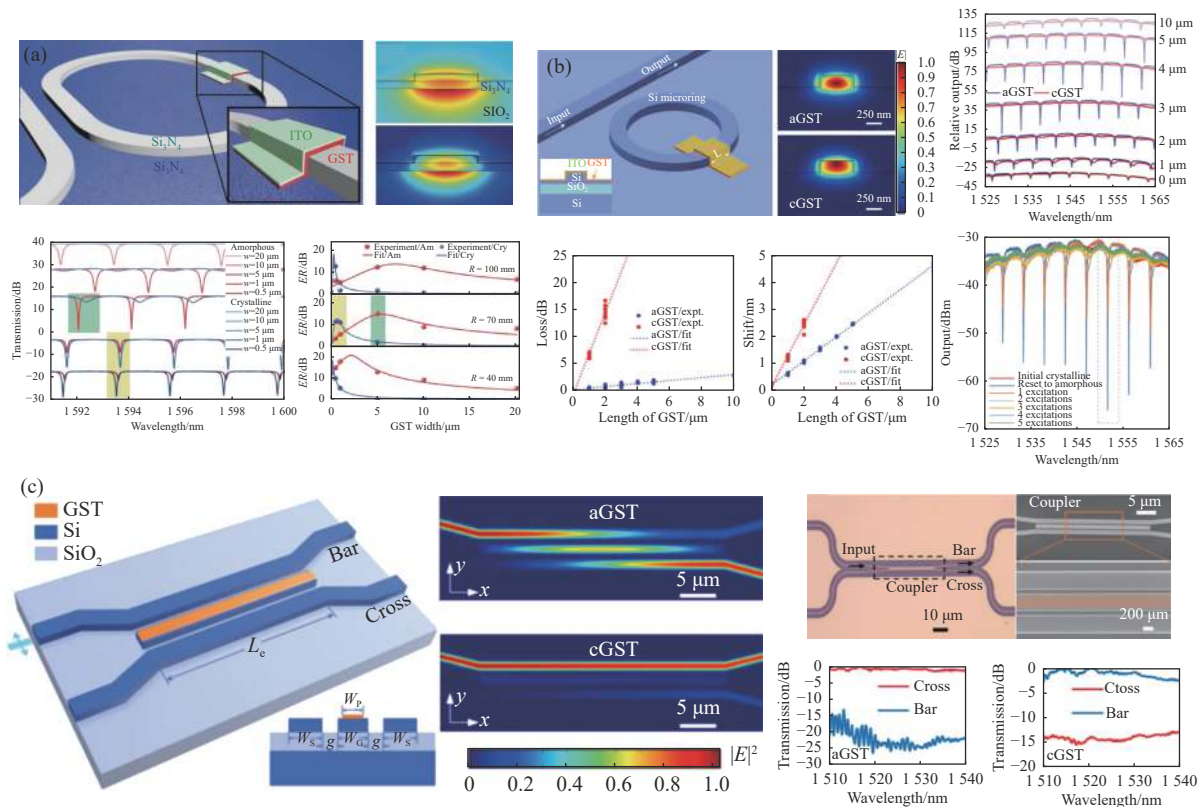


图 10 硫系相变集成光开关。(a) 基于 SiN 覆盖相变 GST 的混合平台示意图^[102]; (b) 硅微环谐振器覆盖 GST 的混合平台示意图^[103]; (c) 基于 GST 的宽带低损耗定向耦合器光开关^[104]

Fig.10 Integrated photonic chalcogenide phase-change switching. (a) Schematic of the integrated photonic SiN-on insulator platform for broadband switching operation^[102]; (b) Spectral shift and loss characterization of GST using silicon microring resonators^[103]; (c) Low-loss broadband directional coupler switches based on GST^[104]

与混合波导(上层覆盖有相变材料 GST 的硅波导)之间的相位匹配条件。当 GST 为非晶态时,通过设计波导的结构参数使混合波导与硅波导之间满足相位匹配条件。此时,由于满足相位匹配条件,光从输入硅波导耦合到中央混合波导,而后再耦合到输出波导中,交叉端口呈现高透过率。当 GST 转变为晶态后,中间混合波导的有效折射率发生了巨大的变化,输入硅波导与混合波导不再满足相位匹配条件。输入波导的光将从同一波导中输出,直通端口呈现高透过率。由于光没有通过高损态的中央复合波导,器件的插入损耗较低。类似地,利用单根硅波导与混合波导可以实现 1×2 光开关。实验中,在 200 °C 下对器件进行快速热退火,可以实现相变材料从初始非晶态到晶态的精确相变,最终在通信波段实现了超紧凑(~30 μm)、低损耗(~1 dB)和大带宽(>30 nm)的具有非易失性的硫系相变集成方向耦合器光开关。

3.2 硫系相变集成光存储

当前基于冯诺依曼架构的数字计算机结构是由存储、中央处理单元和 I/O 组成。指令控制单元和逻辑运算单元串联工作, CPU 可访问的数据量总是小于存储在内存中的数据量,导致了著名的冯诺伊曼瓶颈^[105]。硫系相变集成光子器件的非易失、可重构特性可以使处理和存储操作同时发生在同一位置。

2012 年, Pernice 等首次提出了基于硫系相变材料 GST 的集成全光多级存储器^[106], 如图 11(a) 所示。所提出的器件由一个微环谐振器组成, 该谐振器与上载、下载和控制波导耦合, 并在微环的一小段上沉积

了 GST 薄膜。当 GST 处于非晶态时, 微环被设计成几乎临界耦合, 在这种状态下, 可以在下载端口检测到高强度输出。由于 GST 具有较大的实部和虚部折射率对比, 一旦发生相变, 耦合和共振条件都会发生变化。通过控制 GST 的晶化比例, 可以持续地对器件的传输特性进行调制。对传输曲线设置阈值, 可以区分出多个不同晶化程度的 GST, 从而实现集成光路中的多级存储操作。

2015 年, Rios 等实验证明了一种快速、可重复的全光多级多位非易失性光子存储器^[96]。存储单元结构如图 11(b) 所示, 由于 GST 单元与波导倏逝耦合, GST 的相位状态可以确定有效折射率, 从而确定通过波导的光学衰减。同时, 由于存储单元通过与沿波导传播的光的倏逝耦合在存储状态之间切换, 存储器的读取和写入都可以利用超短光脉冲来实现, 并且在尺寸上不受衍射极限的影响。当 GST 从晶态过渡到非晶态后, 低损耗的 GST 单元不会吸收从波导中传输的光, 这使得输出最大(对应于“1”)。当 GST 处于完全结晶状态时, 高吸收的 GST 将会导致传输光的强烈衰减, 这使得输出最小(对应于“0”)。因此, 根据 GST 的状态可以对需要存储的内容进行编码(“0”为晶态, “1”为非晶态)。同时, 在对单个 GST 存储单元晶化的过程中, 通过采用一系列宽度相同但高度不同的脉冲序列, GST 会根据脉冲的能量而发生不同程度的重结晶, 即可产生介于“0”~“1”之间的多个状态, 最终在光存储器实现 8 级存储功能。

进一步使用波分复用(WDM)技术来演示多波长

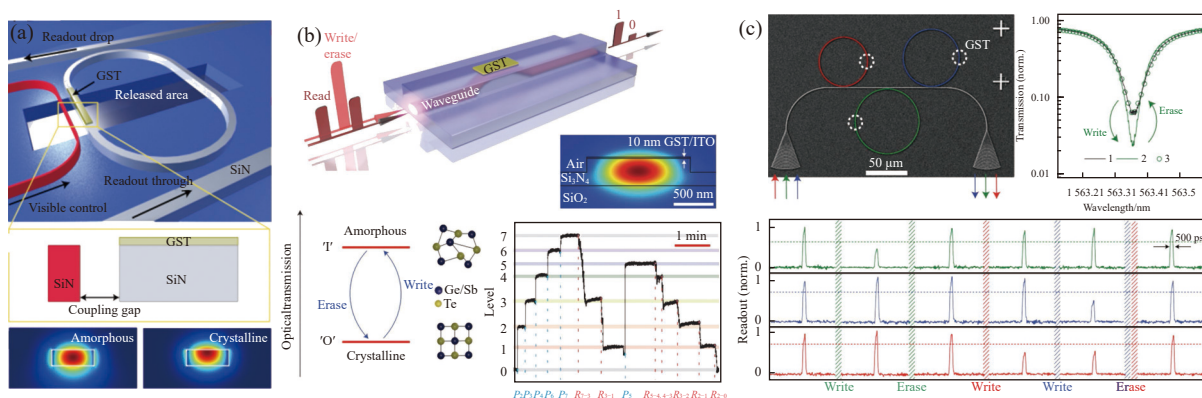


图 11 (a) 基于 Si₃N₄ 微环谐振器实现的全光多级存储器的原理图^[106]; (b) 全光全集成片上多级存储器的工作原理; (c) 多级多位全光存储器^[96]
 Fig.11 (a) Schematic of all-optical multi-level memory based on Si₃N₄ microring resonator^[106]; (b) Operation principle of an all-optical fully integrated on-chip multilevel memory; (c) A multibit and multiwavelength architecture^[96]

存储方案(如图 11(c)所示)。为此,他们利用了耦合到总线波导上的三个环形谐振器的波长滤波特性,这些谐振器有三个不同的谐振波长(在 1550 nm 附近间隔约 1 nm)。由于只有谐振波长才能耦合到环形谐振器,这三个存储单元可以被选择性地寻址用于写入、擦除和读取循环。利用这种波分复用技术和多级寻址技术,Feldmann 等人通过实验演示了 256 个存储单元的寻址,以实现在一个 16×16 存储单元阵列中存储多达 512 位数据的全光子非易失性存储器。

3.3 硫系相变集成光计算

尽管开发出各种特定的电子计算系统来应对快速增长的数据处理,然而,传统计算架构所采用的

冯·诺伊曼结构产生的大量潮汐性数据读写使得计算速率下降的同时增加了单次计算的功耗^[107]。下面将介绍利用上述硫系相变光子器件实现存内光计算。

Feldmann 等展示了一种使用光子存储单元阵列的芯片级全光算盘^[108], GST 相变单元布置在 $N \times N$ 波导阵列交点位置,如图 12(a)所示,多级传输被映射到数字 0(非晶态)和 10(全晶态)。利用皮秒光脉冲,该芯片可以进行基本的算术运算,包括加、减、乘、除的全光运算。他们还证明了对波导交叉结上的相变材料采用双脉冲泵浦方案,并匹配两个脉冲的到达时间,可在 3×3 阵列中实现高精度的光学随机存取。

受电子领域内存计算的启发^[109],研究人员还将

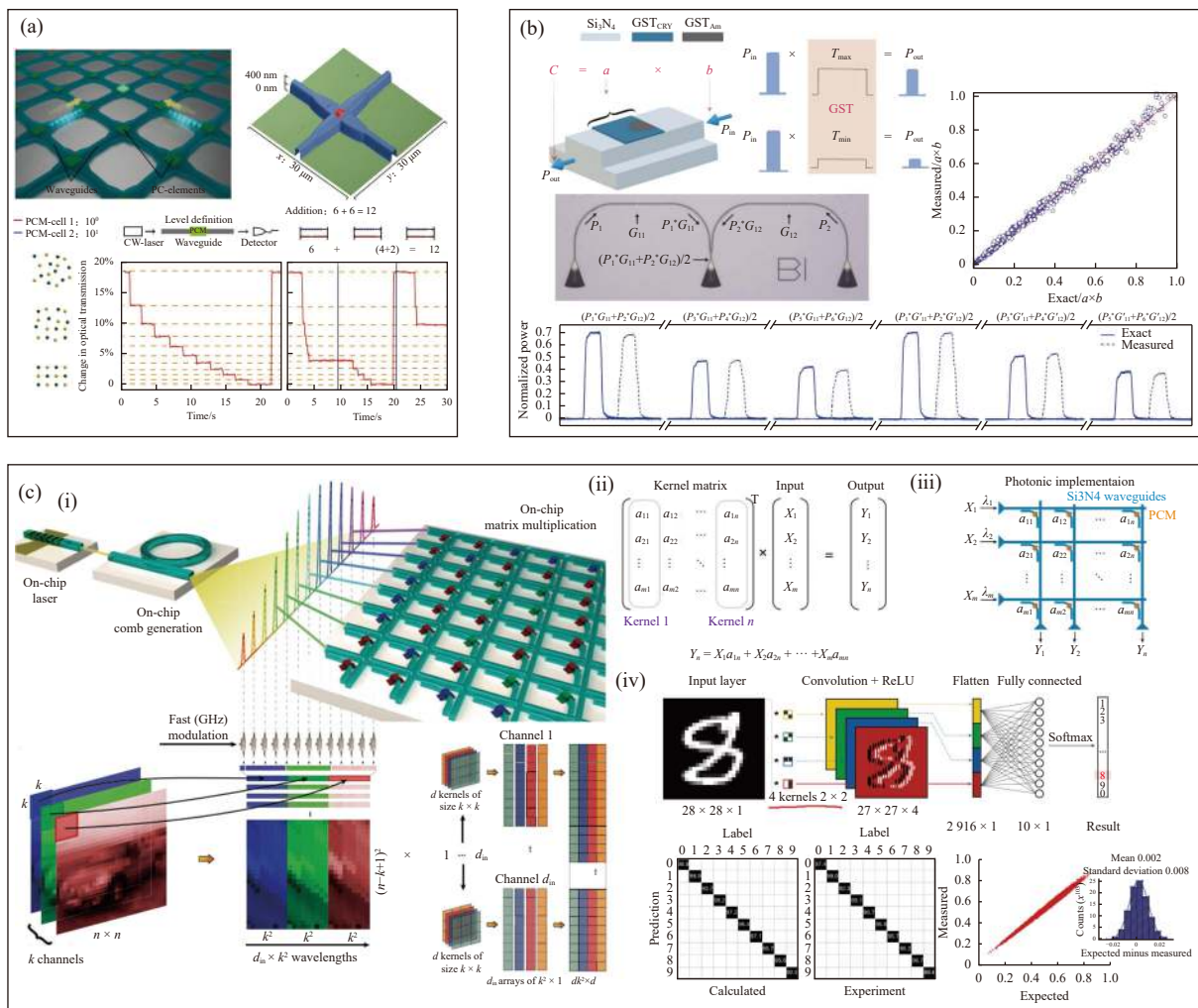


图 12 硫系相变材料集成光矢量矩阵乘法 (VMM) 和神经网络: (a) 基于硫系相变材料-氮化硅平台的芯片级全光算盘^[108]; (b) 硫系相变材料光子内存计算演示光学标量-标量乘法和矩阵向量乘法^[110]; (c) 一种由光频率梳和内存计算单元阵列实现的集成光学张量核心^[111]

Fig.12 PCM based optical VMM and neural networks: (a) A chip-scale all-optical abacus based on GST on Si₃N₄^[108]; (b) Photonic in-memory computing demonstrating optical scalar-scalar multiplication and matrix-vector multiplication^[110]; (c) An integrated photonic tensor core enabled by an optical frequency comb and in-memory computing cell arrays^[111]

硫系相变集成波导用于光学存内计算^[110],并演示了标量-标量乘法和矢量矩阵乘法(VMM),如图12(b)所示。这是通过使用两个脉冲的不同相互作用来实现的,每个脉冲代表一个要相乘的数字。其中,写脉冲能量高于开关阈值以引起相变材料的结构变化,另一个输入脉冲能量则小于阈值能量。当写脉冲功率超过一定阈值功率时,写脉冲功率与传输对比度呈线性关系。这使得标量-标量乘法 $a \times b$ 中的数字 a 和数字 b 可以直接映射到写入功率和输入功率,然后两个存储单元通过一个Y分支连接起来,在 1×2 矩阵和 2×1 向量之间实现VMM。

通过将多个存内计算单元合并到一个交叉阵列中,Feldmann等进一步实现了一种集成的光学张量核心^[111],并使用卷积神经网络(CNN)执行图像处理和数字分类等任务。这主要是通过单独放大和调制SiN微环芯片生成的耗散克尔孤子频率梳的梳齿实现对输入矢量的编码,然后将其发送到由波导交叉结和通过方向耦合器耦合的可重构GST加载波导组成的片上VMM阵列(图12(c)-(i))。矩阵权重或卷积核由GST的结晶程度来设定^[112]。在每个晶胞中,等百分比的光耦合到加载GST的波导中,当光经过相应的光路时,信号强度会进行不同程度的改变,从而完成变量乘法的运算,并且最终结果被编码在输出耦合光强度中。在阵列的底部(图12(c)-(iii)), m 个标量乘法结果非相干地相加,给出向量-矩阵乘法结果(图12(c)-(ii)),最终不同波长的光信号在片外进行分离(DeMux)并转换成电信号,完成矩阵的乘加操作。结合WDM(波分复用)的优势集成光学张量核心只需一个处理单元(单个矩阵)即可同时计算多个VMM,展示了超越当前电子芯片的并行信息处理能力。最后,基于光子张量核心构建了一个CNN,并使用10000张测试图像进行了测试,显示了95.3%的实验分类准确率(图12(c)-(iv))。

4 总结与展望

硫系玻璃具有宽透过范围、高线性折射率和非线性折射率以及较快的非线性响应时间,使得硫系集成光波导在超连续光谱、布里渊散射、波长转换等方面受到业内人士的广泛关注;同时,硫系玻璃凭借着中红外的光谱透过范围也使得硫系光波导在中红外波

段的传感器方面有着良好的应用场景。文中主要总结了近年来硫系光波导在红外波段的性能表征和非线性方面的研究进展以及硫系相变集成光子器件的研究近况。但是,硫系玻璃集成光子器件仍然有很多方面待研究和探索:

(1) 硫系玻璃集成光子器件的性能需要继续提升。硫系波导的传输损耗相对于氮化硅(SiN波导损耗约1 dB/m)还比较高,可通过开发并优化硫系玻璃的提纯工艺和硫系薄膜的沉积工艺来降低薄膜的本征损耗,同时优化器件的制备工艺来获得侧壁光滑的波导形貌。最近,利用在光滑的SiO₂结构上沉积As₂S₃薄膜制备获得了超高品质因子($Q > 10^7$)硫系玻璃微腔^[28],证明硫系光子器件可以实现与SiN平台同一数量级的超低波导损耗。未来,可以在模板化硫系波导制备工艺基础上结合硫系玻璃特有的热回流工艺进一步提升硫系玻璃光子器件的光学性能,促进器件在中红外传感、非线性方面的应用。

(2) 目前硫系光波导的非线性应用研究主要停留在近红外波段,而且实现的功能比较单一,特别是对中红外的非线性应用方面大都处于理论仿真阶段,实验工作相对较少。可以通过改善泵浦功率和泵浦方式、精确调控非线性和色散等方法对器件和泵浦源进行优化,实现器件的全局最优,最终获得超宽带、高相干性和高输出功率的SC谱的输出,拓展中红外硫系光波导SC谱的应用场景,如红外传感、成像等。

(3) 低损耗相变材料将是相变集成光子器件研究的重点。随着近零功耗非易失可重构光路的规模变大,单元开关的插入损耗逐渐累积,最终整个阵列的损耗累积将无法容忍。低损耗的相变材料有潜力将相变集成光开关单元的插入损耗降低到0.1 dB以下,从而可以满足大规模可重构光路的需求。在低损耗相变材料中,Sb₂Se₃^[113]、Sb₂S₃^[114]和GeSbSeTe(GSST)^[115-116]由于在近、中红外波段的低损耗特性而尤为引起人们的关注。这些低损耗相变材料的引入也将使原先无法兼容高损GST相变材料的功能器件(如马赫-曾德尔干涉器^[117],分束器^[118]等)重新进入人们的视野,并有望在光开关、光计算、激光雷达等应用领域发挥巨大作用。另一方面,通过优化硫系玻璃相变材料体系获得可见光范围内透明的相变材料将是一个重要的课题,这将进一步拓展相变材料在集成量子光学和非

易失光学成像上的应用前景^[100]。

(4) 针对大规模集成光路的需求, 片上相变电致开关将是相变集成光子器件研究的另一研究重点。电致相变集成光开关可以解决阵列规模扩大而引入的光路由复杂问题, 虽然使用掺杂硅加热已经证明了低损耗、高能效的电重构光子开关^[119-120], 然而还存在插入损耗高、切换速度慢、调制深度小、循环次数有限等问题, 未来有望利用透明导体(如透明导电氧化物和石墨烯)进一步提升相变集成光开关性能。

参考文献:

- [1] Miller S E. Integrated optics: An introduction [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, 48(7): 2059-2069.
- [2] Jenkins A. The road to nanophotonics [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(5): 258-260.
- [3] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [4] Hunsperger R G, Meyer-Arendt J R. Integrated optics: Theory and technology [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(3): 298.
- [5] Eldada L, Shacklette L W. Advances in polymer integrated optics [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(1): 54-68.
- [6] Boes A, Corcoran B, Chang L, et al. Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700256.
- [7] Ma H, Jen A Y, Dalton L R. Polymer - based optical waveguides: Materials, processing, and devices [J]. *Advanced Materials*, 2002, 14(19): 1339-1365.
- [8] Kawachi M. Silica waveguides on silicon and their application to integrated-optic components [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1990, 22(5): 391-416.
- [9] Roelkens G, Liu L, Liang D, et al. III-V/silicon photonics for on - chip and intra-chip optical interconnects [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 751-779.
- [10] Chrostowski L, Hochberg M. Silicon Photonics Design: From Devices to Systems [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [11] 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.
- [12] Hida Y, Onose H, Imamura S. Polymer waveguide thermo-optic switch with low electric power consumption at 1.3 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(7): 782-784.
- [13] He Sailing, Dai Daoxin. Micro-Nano Photonic Integration [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [14] Cai Chun. Study on III-V group semiconductor MQW planar waveguide optical device[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [15] Leuthold J, Koos C, Freude W. Nonlinear silicon photonics [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 535-544.
- [16] Liu Q, Ramirez J M, Vakarin V, et al. On-chip Bragg grating waveguides and Fabry-Perot resonators for long-wave infrared operation up to 8.4 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34366-34372.
- [17] Long M, Gao A, Wang P, et al. Room temperature high-detectivity mid-infrared photodetectors based on black arsenic phosphorus [J]. *Science Advances*, 2017, 3(6): e1700589.
- [18] Jian Jialing, Ye Yuting, Li Junying, et al. Recent progress of micro/nano photonic devices based on chalcogenide glasses[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(12): 2676. (in Chinese)
- [19] Viens J F, Meneghini C, Villeneuve A, et al. Fabrication and characterization of integrated optical waveguides in sulfide chalcogenide glasses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(7): 1184.
- [20] Krogstad M R, Ahn S, Park W, et al. Optical characterization of chalcogenide Ge-Sb-Se waveguides at telecom wavelengths [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(23): 2720-2723.
- [21] Han T, Madden S, Bulla D, et al. Low loss Chalcogenide glass waveguides by thermal nano-imprint lithography [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19286-19291.
- [22] Lin H, Li L, Zou Y, et al. Demonstration of high-Q mid-infrared chalcogenide glass-on-silicon resonators [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1470-1472.
- [23] Sabapathy T, Ayiriveetil A, Kar A K, et al. Direct ultrafast laser written C-band waveguide amplifier in Er-doped chalcogenide glass [J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(11): 1556-1561.
- [24] Madden S, Choi D Y, Bulla D, et al. Long, low loss etched As_2S_3 chalcogenide waveguides for all-optical signal regeneration [J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14414-14421.
- [25] Hu J, Feng N N, Carlie N, et al. Optical loss reduction in high-index-contrast chalcogenide glass waveguides via thermal reflow [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1469-1478.
- [26] Jean P, Douaud A, Michaud-Belleau V, et al. Etchless chalcogenide microresonators monolithically coupled to silicon photonic waveguides [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2830-

- 2833.
- [27] Jean P, Douaud A, Bah S T, et al. Universal micro-trench resonators for monolithic integration with silicon waveguides [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(9): 2753-2767.
- [28] Kim D G, Han S, Hwang J, et al. Universal light-guiding geometry for on-chip resonators having extremely high Q -factor [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-7.
- [29] Hwang J, Kim D-G, Han S, et al. Supercontinuum generation in As_2S_3 waveguides fabricated without direct etching [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2413-2416.
- [30] Zhang B, Zeng P, Yang Z, et al. On-chip chalcogenide microresonators with low-threshold parametric oscillation [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1272-1279.
- [31] Gai X, Madden S, Choi D Y, et al. Dispersion engineered $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ nanowires with a nonlinear parameter of $136 \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ at 1550 nm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18866-18874.
- [32] Gai X, Choi D Y, Madden S, et al. Polarization-independent chalcogenide glass nanowires with anomalous dispersion for all-optical processing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13513-13521.
- [33] Zhu Y, Wan L, Chen Z, et al. Effects of shallow suspension in low-loss waveguide-integrated chalcogenide microdisk resonators [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(17): 4817-4823.
- [34] Hu J, Tarasov V, Carlie N, et al. Exploration of waveguide fabrication from thermally evaporated Ge-Sb-S glass films [J]. *Optical Materials*, 2008, 30(10): 1560-1566.
- [35] Du Q, Huang Y, Li J, et al. Low-loss photonic device in Ge-Sb-S chalcogenide glass [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(13): 3090-3093.
- [36] Huang Y, Xia D, Zeng P, et al. Engineered raman lasing in photonic integrated chalcogenide microresonators [J]. *arXiv preprint arXiv*, 2021: 210711719.
- [37] Zhang R, Yang Z, Zhao M, et al. High quality, high index-contrast chalcogenide microdisk resonators [J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 17775-17783.
- [38] Yang Z, Zhang R, Wang Z, et al. High- Q , submicron-confined chalcogenide microring resonators [J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33225-33233.
- [39] Du Q, Luo Z, Zhong H, 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.
- [40] Grayson M, Zohrabi M, Bae K, et al. Enhancement of third-order nonlinearity of thermally evaporated GeSbSe waveguides through annealing [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33606.
- [41] Abdel-Moneim N S, Mellor C J, Benson T M, et al. Fabrication of stable, low optical loss rib-waveguides via embossing of sputtered chalcogenide glass-film on glass-chip [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(2): 351-361.
- [42] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J. Photonic-chip-based frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 158-169.
- [43] Shang H, Zhang M, Sun D, et al. Optical characterization of $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{S}_{64.5}$ glass for an on-chip supercontinuum [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(18): 5451-5455.
- [44] Zeng P, Xia D, Yang Z, et al. High- Q Ge-As-S Microring Resonators based on improved fabrication process for optical parametric amplifier [C]//Proceedings of the CLEO: Applications and Technology, 2020.
- [45] Chiles J, Malinowski M, Rao A, et al. Low-loss, submicron chalcogenide integrated photonics with chlorine plasma etching [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(11): 111110.
- [46] Xia D, Huang Y, Zhang B, et al. Engineered Raman lasing in photonic integrated chalcogenide microresonators [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022: 2100443.
- [47] Gai X, Choi D Y, Madden S, et al. Supercontinuum generation in the mid-infrared from a dispersion-engineered As_2S_3 glass rib waveguide [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3870-3872.
- [48] Ma P, Choi D Y, Yu Y, et al. Low-loss chalcogenide waveguides for chemical sensing in the mid-infrared [J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29927-29937.
- [49] Ma P, Choi D Y, Yu Y, et al. High Q factor chalcogenide ring resonators for cavity-enhanced MIR spectroscopic sensing [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19969-19979.
- [50] Shen W, Zeng P, Yang Z, et al. Chalcogenide glass photonic integration for improved $2 \mu\text{m}$ optical interconnection [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(9): 1484-1490.
- [51] Lin H, Zou Y, Danto S, et al. Mid-infrared As_2Se_3 chalcogenide glass-on-silicon waveguides [C]//Proceedings of the The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP), IEEE, 2012.
- [52] Yu Y, Gai X, Ma P, et al. Experimental demonstration of linearly polarized $2-10 \mu\text{m}$ supercontinuum generation in a chalcogenide rib waveguide [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 958-961.
- [53] Lin H, Xiang Y, Li L, et al. High- Q mid-infrared chalcogenide glass resonators for chemical sensing [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, IEEE, 2014.

- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Pi M, Zheng C, Zhao H, et al. Mid-infrared ChG-on-MgF₂ waveguide gas sensor based on wavelength modulation spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4797-4800.
- [57] Tittel F. Environmental trace gas detection using laser spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 1998, 67(3): 273-273.
- [58] Craig I M, Taubman M S, Lea A S, et al. Infrared near-field spectroscopy of trace explosives using an external cavity quantum cascade laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30401-30414.
- [59] Robinson M R, Eaton R P, Haaland D M, et al. Noninvasive glucose monitoring in diabetic patients: A preliminary evaluation [J]. *Clinical Chemistry*, 1992, 38(9): 1618-1622.
- [60] Charrier J, Brandily M-L, Lhermite H, et al. Evanescent wave optical micro-sensor based on chalcogenide glass [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173: 468-476.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] Mittal V, Nedeljkovic M, Rowe D J, et al. Chalcogenide glass waveguides with paper-based fluidics for mid-infrared absorption spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2913-2916.
- [64] Pi M, Zheng C, Ji J, 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.
- [65] Pi M, Zheng C, Bi R, 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.
- [66] 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.
- [67] Wang Y, Chen W, Wang P, 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.
- [68] Xu P, Yu Z, Shen X, et al. High quality factor and high sensitivity chalcogenide 1D photonic crystal microbridge cavity for mid-infrared sensing [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 361-365.
- [69] Nalivaiko V, Ponomareva M. Optical grating waveguide sensors based on chalcogenide glasses [J]. *Optics and Spectroscopy*, 2019, 126(4): 439-442.
- [70] Huang W, Luo Y, Zhang W, et al. High-sensitivity refractive index sensor based on Ge-Sb-Se chalcogenide microring resonator [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021: 103792.
- [71] Zhang X, Zhou C, Luo Y, et al. High Q -factor, ultrasensitivity slot microring resonator sensor based on chalcogenide glasses [J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3866-3875.
- [72] Lamont M R, Luther-Davies B, Choi D Y, et al. Supercontinuum generation in dispersion engineered highly nonlinear ($\gamma=10/\text{W/m}$) As₂S₃ chalcogenide planar waveguide [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14938-14944.
- [73] Yeom D I, Mägi E C, Lamont M R, et al. Low-threshold supercontinuum generation in highly nonlinear chalcogenide nanowires [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 660-662.
- [74] Karim M, Rahman B, Agrawal G P. Dispersion engineered Ge_{11.5}As₂₄Se_{64.5} nanowire for supercontinuum generation: A parametric study [J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31029-31040.
- [75] Shang H, Sun D, Zhang M, et al. On-chip detector based on supercontinuum generation in chalcogenide waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(12): 3890-3895.
- [76] Yu Y, Gai X, Wang T, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenides [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(8): 1075-1086.
- [77] Yu Y, Gai X, Ma P, et al. A broadband, quasi-continuous, mid-infrared supercontinuum generated in a chalcogenide glass waveguide [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): 792-798.
- [78] Xia D, Huang Y, Zhang B, et al. On-chip broadband mid-infrared supercontinuum generation based on Highly nonlinear chalcogenide glass waveguides [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 93.
- [79] Qiu W, Rakich P T, Shin H, et al. Stimulated Brillouin scattering in nanoscale silicon step-index waveguides: A general framework of selection rules and calculating SBS gain [J].

- Optics Express*, 2013, 21(25): 31402-31419.
- [80] Rakich P T, Davids P, Wang Z. Tailoring optical forces in waveguides through radiation pressure and electrostrictive forces [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 14439-14453.
- [81] Pant R, Poulton C G, Choi D Y, et al. On-chip stimulated Brillouin scattering [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8285-8290.
- [82] Kabakova I V, Pant R, Choi D Y, et al. Narrow linewidth Brillouin laser based on chalcogenide photonic chip [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3208-3211.
- [83] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, et al. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity [J]. *Optica*, 2015, 2(2): 76-83.
- [84] Morrison B, Casas-Bedoya A, Ren G, et al. Compact Brillouin devices through hybrid integration on silicon [J]. *Optica*, 2017, 4(8): 847-854.
- [85] Song J, Guo X, Peng W, et al. Stimulated Brillouin scattering in low-loss $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ chalcogenide waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 5048-5053.
- [86] Eggleton B J, Poulton C G, Rakich P T, et al. Brillouin integrated photonics [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(10): 664-677.
- [87] Rong H, Xu S, Cohen O, et al. A cascaded silicon Raman laser [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(3): 170-174.
- [88] Latawiec P, Venkataraman V, Burek M J, et al. On-chip diamond Raman laser [J]. *Optica*, 2015, 2(11): 924-928.
- [89] Liu X, Sun C, Xiong B, et al. Integrated continuous-wave aluminum nitride Raman laser [J]. *Optica*, 2017, 4(8): 893-896.
- [90] Fang Z, Luo H, Lin J, et al. Efficient electro-optical tuning of an optical frequency microcomb on a monolithically integrated high- Q lithium niobate microdisk [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5953-5956.
- [91] Vanier F, Rochette M, Godbout N, et al. Raman lasing in As_2S_3 high- Q whispering gallery mode resonators [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 4966-4969.
- [92] Vanier F, Peter Y A, Rochette M. Cascaded Raman lasing in packaged high quality As_2S_3 microspheres [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28731-28739.
- [93] Andrianov A V, Anashkina E A. Tunable Raman lasing in an As_2S_3 chalcogenide glass microsphere [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5580-5587.
- [94] Graydon O. Birth of the programmable optical chip [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 1.
- [95] Loke D, Lee T, Wang W, et al. Breaking the speed limits of phase-change memory [J]. *Science*, 2012, 336(6088): 1566-1569.
- [96] Rios C, Stegmaier M, Hosseini P, et al. Integrated all-photonics non-volatile multi-level memory [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 725-732.
- [97] Zhang Q, Zhang Y, Li J, et al. Broadband nonvolatile photonic switching based on optical phase change materials: Beyond the classical figure-of-merit [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 94-97.
- [98] Zhang B, Sun Y, Xu Y, et al. Loss-induced switching between electromagnetically induced transparency and critical coupling in a chalcogenide waveguide [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2828-2831.
- [99] Abdollahramezani S, Hemmatyar O, Taghinejad H, et al. Tunable nanophotonics enabled by chalcogenide phase-change materials [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(5): 1189-1241.
- [100] Fang Z, Chen R, Zheng J, et al. Non-volatile reconfigurable silicon photonics based on phase-change materials [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 28(3): 1-17.
- [101] Nisar M S, Yang X, Lu L, et al. On-chip integrated photonic devices based on phase change materials [C]//Proceedings of the Photonics, 2021.
- [102] Rios C, Hosseini P, Wright C D, et al. On - chip photonic memory elements employing phase - change materials [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(9): 1372-1377.
- [103] Zheng J, Khanolkar A, Xu P, et al. GST-on-silicon hybrid nanophotonic integrated circuits: A non-volatile quasi-continuously reprogrammable platform [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(6): 1551-1561.
- [104] Xu P, Zheng J, Doylend J K, et al. Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 553-557.
- [105] Fang Z, Zheng J, Saxena A, et al. Non - volatile reconfigurable integrated photonics enabled by broadband low - loss phase change material [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(9): 2002049.
- [106] Pernice W H, Bhaskaran H. Photonic non-volatile memories using phase change materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(17): 171101.
- [107] Cheng Hongwei, Yu Zhenming, Zhang Tian, et al. Advances and challenges of optical neural networks [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500004. (in Chinese)
- [108] Feldmann J, Stegmaier M, Gruhler N, et al. Calculating with light using a chip-scale all-optical abacus [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-8.
- [109] Gallo M L, Sebastian A, Mathis R, et al. Mixed-precision in-

- memory computing [J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(4): 246-253.
- [110] Rios C, Youngblood N, Cheng Z, et al. In-memory computing on a photonic platform [J]. *Science Advances*, 2019, 5(2): eaau5759.
- [111] Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core [J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 52-58.
- [112] Feldmann J, Youngblood N, Li X, et al. Integrated 256 cell photonic phase-change memory with 512-bit capacity [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(2): 1-7.
- [113] Delaney M, Zeimpekis I, Lawson D, et al. A new family of ultralow loss reversible phase - change materials for photonic integrated circuits: Sb_2S_3 and Sb_2Se_3 [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(36): 2002447.
- [114] Dong W, Liu H, Behera J K, et al. Wide bandgap phase change material tuned visible photonics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(6): 1806181.
- [115] Zhang Y, Chou J B, Li J, et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-9.
- [116] Zhang Y, Fowler C, Liang J, et al. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(6): 661-666.
- [117] Yang X, Nisar M S, Yuan W, et al. Phase change material enabled 2×2 silicon nonvolatile optical switch [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4224-4227.
- [118] Alquliah A, Elkabbash M, Cheng J, et al. Reconfigurable metasurface-based 1×2 waveguide switch [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(10): 2104-2115.
- [119] Zheng J, Fang Z, Wu C, et al. Nonvolatile electrically reconfigurable integrated photonic switch enabled by a silicon PIN diode heater [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(31): 2001218.
- [120] Zhang H, Zhou L, Lu L, et al. Miniature multilevel optical memristive switch using phase change material [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(9): 2205-2212.