

光学学报

硫系集成光子学

张斌^{1,2*}, 李朝晖^{1,2,3**}

¹中山大学电子与信息工程学院广东省光电信息处理芯片与系统重点实验室, 广东 广州 510275;

²中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275;

³南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000

摘要 高品质光子材料是集成光子学领域发展的重要基础。近年来,硅基硫系集成光子器件在光信息处理芯片和系统应用方面获得了广泛研究。梳理了硫系玻璃材料、集成光器件、系统应用之间的影响关系,介绍了超低损耗硫系集成光子器件的制备技术路线及其在光信息处理领域的最新研究进展。因硫系玻璃具有超大带宽的透光窗口、高克尔非线性、大光弹系数和易于片上混合集成等特点,硫系光子集成器件在光信息处理应用领域体现出多谱段、低阈值和多功能集成的优势。最后结合硫系材料特点,对硫系集成光子器件在未来多功能光子集成器件及高速光信息处理应用中的机遇和挑战进行了展望。

关键词 集成光学; 光子集成器件; 硫系玻璃; 非线性; 声光效应; 混合集成

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2313001

Integrated Chalcogenide Photonics

Zhang Bin^{1,2*}, Li Zhaohui^{1,2,3**}

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing Chips and Systems, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

²State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

³Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, Guangdong, China

Abstract High-quality photonic materials are important basis for the development of integrated photonics. In recent years, integrated silicon-based chalcogenide photonic devices have been widely researched for optical information processing chips and systematic application. This paper reviews the influencing relationships among chalcogenide glass (ChG) materials, integrated photonic devices, and systematic application. Then, we outlines the technical route of preparing integrated chalcogenide photonic devices with ultra-low loss and the latest research progress of such devices in optical information processing. Integrated chalcogenide photonic devices show great advantages, such as multi-spectrum, low threshold, and multi-functional integration, in their application in optical information processing as ChGs are characterized by ultra-broadband transmission window, high Kerr nonlinearity, large photoelastic coefficient, and readiness for on-chip hybrid integration. Finally, on the basis of the characteristics of chalcogenide materials, this paper presents the opportunities and challenges for integrated chalcogenide photonic devices in future multifunctional integrated photonic devices and their application in high-speed optical information processing.

Key words integrated optics; integrated photonic device; chalcogenide glass; nonlinearity; acousto-optic effect; hybrid integration

1 前言

近 20 年来,随着信息技术的快速发展,全球通信

数据正以指数级的速度增长,对通信、存储和量子计算等领域的信息处理芯片提出了更高的要求^[1-5]。光子集成器件和技术促进了光信息产生、传递、处理和存储

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-05-27; 录用日期: 2022-06-07

基金项目: 国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项(2019YFA0706300)、国家重点研发计划(2018YFB1801003)、国家自然科学基金(U2001601, 61975242)

通信作者: *zhangbin5@mail.sysu.edu.cn; **lzh88@mail.sysu.edu.cn

的快速发展,成为信息领域的重要发展方向^[6-9]。随着光通信网络和数据中心的快速发展,当前光信息网络面临的爆炸式增长的信息总量与有限的可用物理资源(如能源、空间、信道等)之间的矛盾,已经成为光信息领域的主要矛盾^[2],这更加凸显了光子芯片在能耗、体积和成本方面的优势,同时也对新一代光子芯片的带宽、功耗、多功能集成等特性提出更高的要求^[10-11]。

大规模集成的光子芯片是国内外科学家一直不懈的追求,目前比较典型的有硅光子集成器件、氧化硅光子集成器件等^[1,3,12]。硅光子集成器件具有大折射率差,且半导体制备工艺成熟,具有高集成度、低成本的优势,是目前光电子芯片中发展最成熟的器件。然而,硅光波导的损耗较高(1 dB/cm量级),通信波段严重的双光子吸收和载流子效应也限制了其在非线性和多功能化方面的发展。氧化硅平台因其较小的芯包层折射率差,在实现高集成度光子器件方面受到限制^[12]。因此,开发高品质新光子集成平台材料成为光子集成领域发展的重要任务。而且,异质混合集成技术的进步推动了多种功能材料平台集成的光子芯片快速发展。近年来,涌现出了一系列的新光子集成材料,如Ⅲ-V族材料、氮化硅、铌酸锂、碳化硅、氮化铝和硫系材料等^[13-18],基于新平台材料的光子集成器件极大促进了光信息产生、调制、交换和处理方面的快速发展。

硫系玻璃材料是由ⅥA主族中一种或多种硫族元素[硫(S)、硒(Se)、碲(Te)]与其他金属或非金属元素组成的非晶体化合物。自20世纪中期,硫系玻璃材料在红外成像镜头、红外光纤、信息存储器和太阳能电池等领域获得广泛的应用和研究。目前国内外已经实现硫系玻璃块体材料和光纤的商品化。如图1和表1

所示,硫系玻璃具有超宽透光窗口(0.5~25 μm)^[19]、高线性折射率(n_0 为2.2~3.5)^[20]和非线性折射率^[21]($n_2 > 10^{-18}$ m²/W,比石英高2~3个量级)、小热光系数($\approx 3 \times 10^{-5}$ K⁻¹)等特性,同时具有较大的布里渊增益系数($g_B \approx 5.51 \times 10^{-9}$ m/W^[22])与拉曼增益系数 $[g_R \approx (2 \sim 3) \times 10^{-11}$ m/W,约为石英光纤的数百倍^[23]]。表1中 Q_{mt} 为微腔本征Q值,TPA为双光子吸收系数。硫系玻璃材料具有较大的带隙宽度^[24],因此在整个透光窗口基本不存在双光子吸收效应。硫系材料具有非晶结构特性,可以通过低温(<350 °C)沉积技术在晶体和非晶体平台上实现大尺寸晶圆级薄膜制备,该技术不需要复杂的键合工艺,非常适合低成本、批量化的芯片制备。1968年奥弗申斯基发表了关于利用硫系薄膜制作开关器件的专利,引起了人们对非晶半导体材料的研究兴趣。到2010年左右,英国、俄罗斯、美国、澳大利亚、加拿大等国家的科研机构先后建立了硫系玻璃基光子集成器件的制备和应用研究平台。特别是近年来,随着高激光损伤阈值、不含砷(As)元素的新型硫系玻璃材料的开发和硫系片上光子器件加工工艺的成熟,一系列高品质的硫系光子集成器件被开发出来,并在光子信号处理芯片和系统应用中展示出独特的优势。

因此,本文对硫系光子集成器件的制备和应用的研究进展进行综述。首先将介绍超低损耗硫系薄膜和集成光子器件的制备技术路线,从硫系材料特点出发对硫系光子集成器件在光信号传输、处理、探测和调制等方面的研究进展进行了综述,并结合目前存在的问题和硫系材料在混合集成方面的优势,对未来的发展方向和研究内容进行了展望。

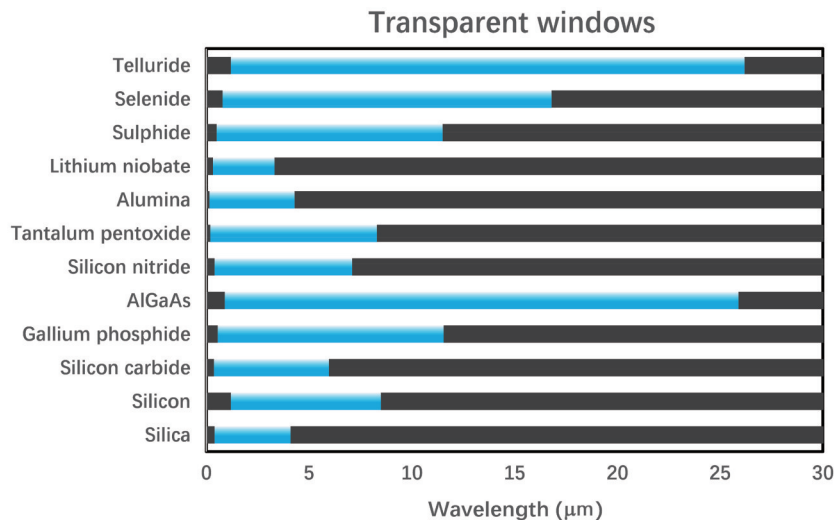


图1 部分材料的红外透光窗口^[25-29]

Fig. 1 Infrared transmission window of some materials^[25-29]

2 硫系集成光子器件制备

制备超低损耗的硫系光子集成器件一直以来都是该领域的研究热点。虽然硫系玻璃块体材料的制备工艺已经非常成熟,并有多种商品化硫系玻璃块体材料

实现了在红外透镜的规模化应用。但硫系材料较弱的化学键导致硫系薄膜,特别是含砷元素的硫系薄膜常表现出易氧化、低激光损伤阈值等问题,因此很难通过传统的微纳加工工艺制备超低损耗的硫系片上光子器件。经过20多年的发展,研究人员不断开发稳定的硫

表 1 部分材料对应 1.55 μm 的非线性光学参数
Table 1 Nonlinear optical parameters of some materials at 1.55 μm

Material	Geometry	$n_2 / (10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1})$	Loss / (dB · cm ⁻¹)	$Q_{\text{m}} / 10^6$	TPA / (m · W ⁻¹)
As ₂ S ₃ ^[30]	Waveguide	3	0.1	—	Negligible
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5} ^[31]	Waveguide	8.6	2.6	—	10 ⁻¹³
Ge ₂₂ Sb ₁₈ Se ₆₀ ^[32]	Waveguide	5.1	4	—	4 × 10 ⁻¹³
Si ^[33]	Waveguide	6	4	—	5 × 10 ⁻¹²
AlGaAs ^[34-36]	Waveguide	14.3	3.2	—	5 × 10 ⁻¹²
LiNbO ₃ ^[37]	Microring	0.18	—	~4	Negligible
SiC ^[38]	Microdisk	0.8	—	7.1	Negligible
Si ₃ N ₄ ^[39-40]	Microring	0.25	—	422	Negligible
AlN ^[41]	Microring	~0.35	—	1.1	Negligible
GaN ^[42]	Microring	1.4	0.24	1.8	Negligible
GaP ^[43]	Microring	11	1.2	2	Negligible

系薄膜、优化微纳加工工艺,逐步形成了一套成熟的、与现有硅光集成器件兼容的硫系集成光子器件的制备流程。

2.1 硫系薄膜制备

高品质的硫系玻璃光学薄膜沉积工艺是制备超低损耗、稳定的光子集成器件的重要基础。过去 20 多年出现了很多种硫系薄膜的制备方式,包括磁控溅射法^[44-47]、脉冲激光沉积法^[48-49]、溶胶-凝胶法^[50-51]、热蒸镀沉积^[30,52-53]和化学气相沉积工艺^[54-63]。根据工艺的成熟度和实用性,可以将这些工艺分为探索式硫系薄膜沉积工艺、真空热蒸镀(TE)法和化学气相沉积工艺三类。

1) 探索式硫系薄膜沉积工艺

这类硫系材料薄膜沉积工艺主要有三种:磁控溅射法、脉冲激光沉积法、溶胶-凝胶法。这些方法的优势是沉积工艺简单方便,薄膜组分与靶材组分一致性好,适用于硫系玻璃中原子间蒸气压差较大的硫系材料薄膜沉积。这类薄膜比较适合探索硫系薄膜中分子调控与薄膜特性的研究,但沉积薄膜的表面粗糙度较高,光学损耗较大,很少被用来制备对光学损耗要求较高的光子集成器件。

磁控溅射法是通过等离子束轰击硫系靶材,使得原子溅射后再沉积在基底上,形成薄膜。这种方法适用于多元组分^[44-45]、硫系相变材料^[46]、稀土掺杂硫系薄膜^[47]的制备,薄膜厚度和折射率均匀性较好。但是制备的薄膜的沉积速度控制精度差,薄膜的表面粗糙度较高,目前主要用于制备易结晶的相变材料和稀土掺杂的硫系薄膜^[46,64]。

脉冲激光沉积法需要高能量密度的激光聚焦在硫系材料靶材上,靶材中的原子被蒸发并形成等离子体束流后沉积在基底上,形成薄膜。脉冲激光对不同原子组成的硫系材料的烧蚀温度接近,容易获得化学计量比与靶材一致的硫系薄膜材料,适用于多元组分或者稀土掺杂的硫系材料体系^[65]。但这种薄膜沉积过程存在过大的压应力,同时高能量的离子束可能会引入很多表面颗粒缺陷和裂缝,薄膜的表面粗糙度较高,很

难制备均匀的大面积薄膜^[48-49]。

溶胶-凝胶法将硫系材料在溶剂中均匀混合,通过水解、缩合等过程形成透明均匀分散的溶胶,通过旋涂方式将溶胶均匀涂布在基底后,将溶剂蒸发后形成薄膜材料。目前该方法主要用于可以在有机溶剂中均匀分散的含 As 的二元化合物材料,如 As₂S₃、As₂Se₃。该方法具有操作简单、薄膜成本低、可批量化制备等优势,但溶剂残留导致薄膜致密性较差、表面粗糙度高、光学损耗较大,而且使用的有机溶剂一般毒性较大,对环境有污染^[50-51]。

2) 真空热蒸镀法

目前该方法是制备硫系玻璃薄膜工艺中应用最为广泛的沉积技术^[66],是在真空腔体内通过加热硫系材料、原子气化后冷却沉积在基底上形成薄膜。该工艺操作简单、成本低、沉积速度可控、薄膜表面粗糙度最低,适合制备大尺寸、高均匀性的硫系薄膜材料^[30,52-53]。2020 年, Kim 等^[66]在预先制备的 SiO₂ 微盘顶部通过热蒸镀沉积的 As₂S₃ 薄膜的表面粗糙度仅为 0.3 nm,也因此获得了 As₂S₃ 微盘谐振腔的 Q 值高达 1.44 × 10⁷,这是目前硫系片上光子微腔中最高品质因子的报道,同时也验证了热蒸镀工艺制备超光滑表面硫系薄膜的可行性。而且该工艺整个过程都在超高真空状态下进行,在沉积薄膜完成后还可以采用原位退火工艺提高薄膜内形成化学键的稳定性、降低表面粗糙度等,并且可显著提升薄膜的稳定性和光学品质^[30,53]。2022 年, Xia 等^[67]在硅基衬底上沉积 GeSbS 薄膜,通过热退火处理后,薄膜的表面粗糙度降低至 0.25 nm。但该方法沉积含有蒸气压差较大的原子组分的硫系靶材时,获得的薄膜组分重复性较差,这在一定程度上限制了新组分硫系薄膜的开发和应用。

3) 化学气相沉积工艺

为了实现精确的硫系薄膜组分控制和促进硫系材料与其他材料平台的异质集成,研究人员开发了与 CMOS 工艺兼容的化学气相沉积(CVD)工艺,制备了新型硫系玻璃薄膜^[54-57]。目前采用该工艺制备了不同

组分的硫系材料薄膜,包括 GaLaS/GeS^[58]、GeS₂^[59]、Ge_xSe_{1-x}^[60]、As₂S₃^[61,68]、As₂Te₃^[62]和 AsSeTe^[63]。该方法可以通过改变衬底温度、反应气压和气体流速等工艺参数精确控制薄膜的厚度和组分,可实现与衬底黏

附性强、均匀性和重复性好、可批量化生产的硫系薄膜。但目前该工艺还不够成熟,实现批量稳定的硫系薄膜的制备还需要很多参数需要优化。图 2 为不同方法沉积的硫系薄膜的表面形貌。

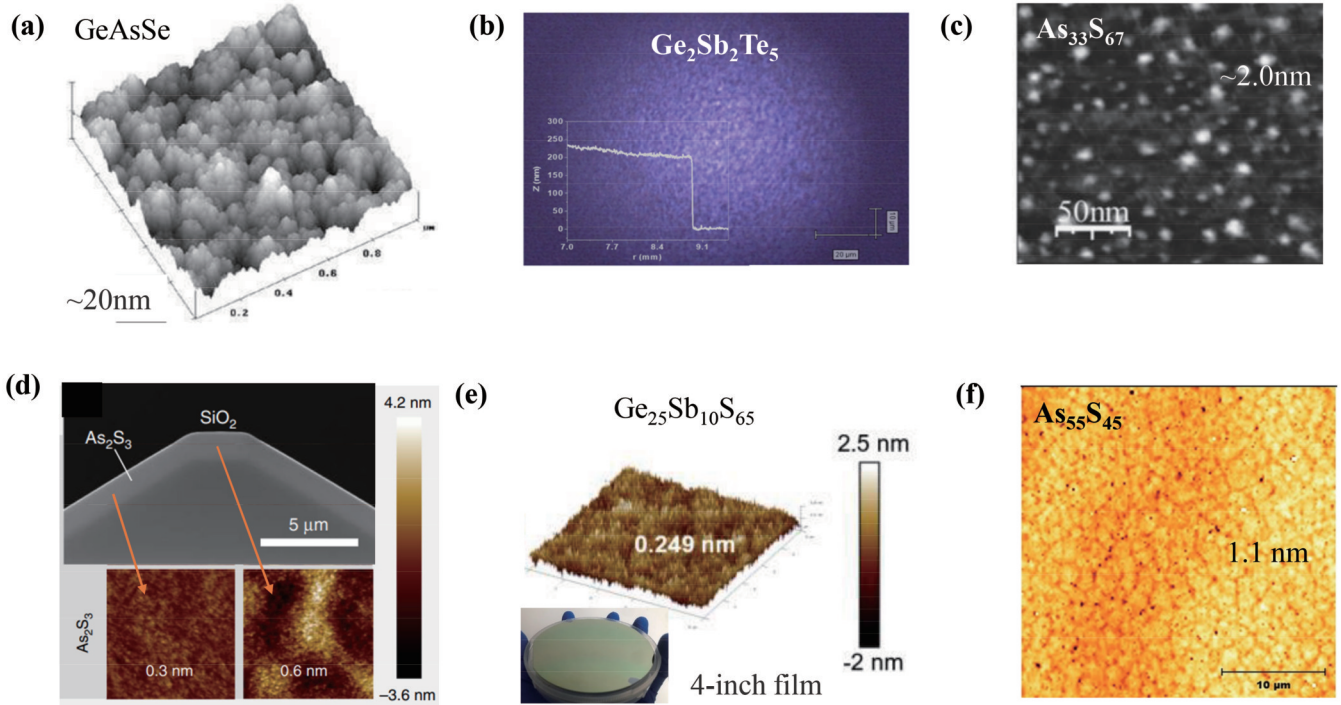


图 2 不同方法沉积的硫系薄膜的表面形貌。(a)磁控溅射法沉积 GeAsSe 薄膜的原子力显微镜图片^[69]; (b)飞秒脉冲激光法沉积 (PLD)的 Ge₂Sb₂Te₅ 薄膜的光学显微镜照片^[65]; (c)溶胶-凝胶法制备的 As₃₃S₆₇ 薄膜的原子力显微镜图片^[70]; (d)热蒸镀法在 SiO₂ 微盘上沉积的 As₂S₃ 薄膜^[66]; (e)热蒸镀法制备的 4 inch (1 inch=2.54 cm) Ge₂₅Sb₁₀S₆₅ 薄膜^[67]; (f) PECVD 法制备的 As₅₅S₄₅ 薄膜^[68]

Fig. 2 Surface topographies of ChG films deposited by different methods. (a) AFM image of GeAsSe films deposited by magnetron sputtering^[69]; (b) optical microscopy image of Ge₂Sb₂Te₅ thin film deposited by fs-PLD^[65]; (c) AFM image of As₃₃S₆₇ film fabricated by sol-gel process^[70]; (d) As₂S₃ films deposited on SiO₂ microdisks by thermal evaporation^[66]; (e) 4 inch Ge₂₅Sb₁₀S₆₅ film fabricated by thermal evaporation^[67]; (f) As₅₅S₄₅ film fabricated by PECVD^[68]

2.2 硫系集成光子器件制备

目前,可用于加工硫系集成光子器件的制备方法包括激光直写^[71]、离子注入^[72-74]、热压印^[75-78]、湿法刻蚀^[79]、剥离技术 (lift-off)^[80-83]、干法刻蚀^[84]等技术。其中,目前采用电子束或紫外曝光技术结合干法刻蚀的方法是制备硫系集成光子器件应用最广泛、与现在标准半导体加工工艺兼容的方法。这里分别介绍每种工艺的路线和特点。

激光直写、离子注入和热压印是不需要采用光刻和刻蚀过程加工光波导的制备技术,操作简单,工艺设备投入低。激光直写工艺利用硫系材料的光敏特性,通过激光精确照射硫系薄膜特定区域,使照射区域和非照射区域形成折射率差,制备的光波导的最低传输损耗为 0.5 dB/cm^[71]。但该方法依赖材料本身的光敏特性,辐照的激光功率抖动会使光波导的侧壁结构不平滑,并且该方法形成的折射率差有限,限制了光子器件集成度的提高。离子注入法通过在硫系薄膜表面注入离子束,改变辐照区域的折射率,形成光波导,如将银 Ag 掺杂到 As₂S₃^[72]、As₂Se₃^[73]或者 GeS₂^[74]薄膜中形成光波导。但

离子注入对掺杂工艺要求苛刻,注入粒子分布不均会导致波导内部散射损耗高。热压印法(纳米压印技术)可以进行晶圆级的复杂波导和器件制备,具有波导形貌均匀性好、成本低、工艺简单的特点,目前主要用于软化温度低的硒化物硫系玻璃组分,如 As₂₄S₃₈Se₃₈^[78]、Ge_{11.5}As₂₄Se_{64.5}^[76]、As₂Se₃^[77]的波导制备,在 1.55 μm 波长处获得的最低传输损耗为 0.26 dB/cm^[75]。但该方法的加工精度取决于压印模具的尺寸精度,目前光子集成器件的集成度不高,而且压印过程薄膜容易分解和结晶,而脱模过程形成的波导侧壁容易受到影响^[75]。

湿法刻蚀工艺通过化学溶剂刻蚀覆有图案化模板的薄膜制备波导,刻蚀速率高,选择性好,但采用的化学溶剂通常为碱性,会对硫系玻璃造成各向同性腐蚀,波导的形貌和尺寸精度差,易残留的化学溶剂颗粒造成波导侧壁粗糙度高^[79],现在该方法在硫系波导制备中使用较少。

剥离法通常会降低侧壁粗糙度,但表面粗糙度明显^[80]。2007年, Hu 等^[80-82]采用剥离法制备了 Ge₂₃Sb₇S₇₀ 条形和脊形波导,传输损耗低至 0.5 dB/cm。2010年,

Hu 等^[82]在剥离制备完成 As_2S_3 波导后,引入热回流工艺降低表面粗糙度,最终验证了传输损耗可以降低 50%。2013 年, Lin 等^[83]使用光刻和剥离工艺制备了

As_2S_3 硫系微环谐振腔,在 $5.2\ \mu\text{m}$ 波长获得的 Q 值高达 2×10^5 。图 3 为不同波导加工方法加工的硫系波导的形貌照片。

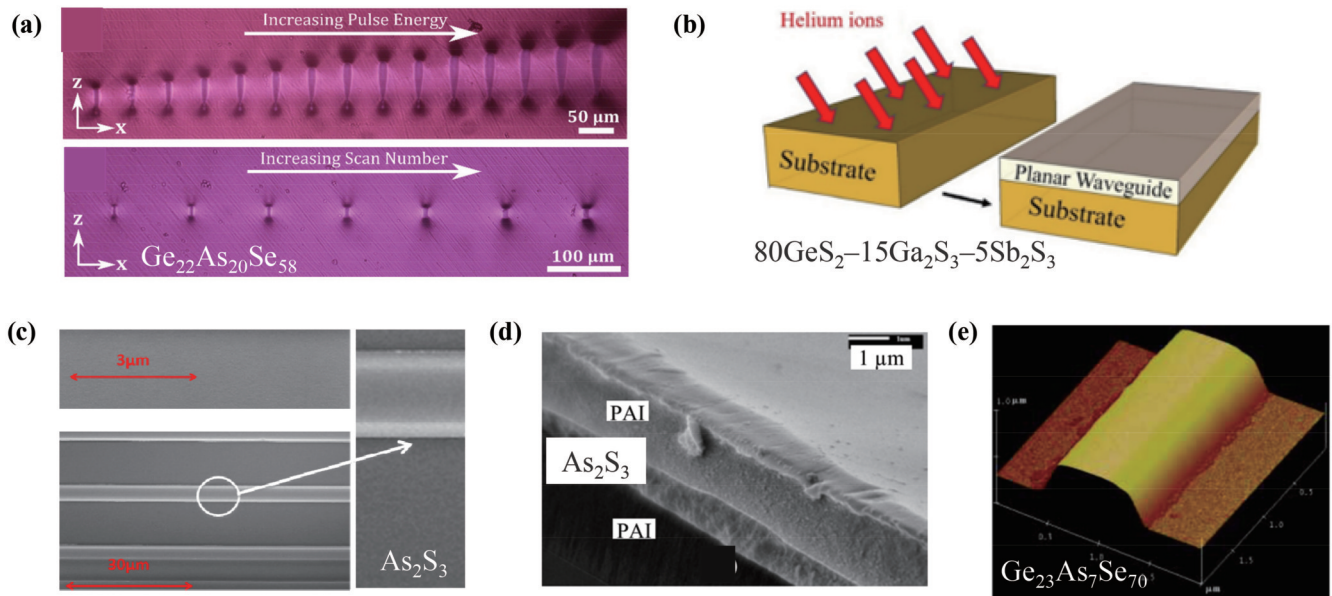


图 3 不同波导加工方法加工的硫系波导的形貌照片。(a)激光直写法制备的 $\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$ 波导的光学显微镜照片^[71]; (b)氦离子注入法制备 $80\text{GeS}_2-15\text{Ga}_2\text{S}_3-5\text{Sb}_2\text{S}_3$ 波导的示意图^[85]; (c)热压印法制备的 As_2S_3 波导的扫描电子显微镜照片^[76]; (d)湿法刻蚀制备的 As_2S_3 波导的扫描电镜照片^[86]; (e)剥离法制备的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{Se}_{70}$ 波导的原子力显微镜照片^[80]

Fig. 3 Morphology images of ChG waveguides obtained by different waveguide fabrication methods. (a) SEM images of $\text{Ge}_{22}\text{As}_{20}\text{Se}_{58}$ waveguide fabricated by direct laser writing^[71]; (b) schematic of $80\text{GeS}_2-15\text{Ga}_2\text{S}_3-5\text{Sb}_2\text{S}_3$ waveguide fabricated by He^+ ions implanting^[85]; (c) SEM images of As_2S_3 waveguide fabricated by thermal printing^[76]; (d) SEM image of As_2S_3 waveguide fabricated by wet-etching^[86]; (e) AFM image of $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{Se}_{70}$ waveguide fabricated by lift-off^[80]

相比上述加工工艺,干法刻蚀法大多采用反应离子刻蚀(RIE)、电感耦合等离子体刻蚀(ICP-RIE)或者两种方式相结合的方法^[53],制备的波导损耗低、尺寸和形貌精度高,适用于单层和多层薄膜加工,易于异质集成波导的稳定加工。结合热回流的后处理工艺,硫系光波导侧壁和顶部粗糙度会显著降低。根据加工结构特点,干法刻蚀法可以分为两类。

1) 类大马士革工艺

2016 年, Zhai 等^[87]提出基于热熔平滑化和微沟槽填充的硫系化合物波导的制造方法,首先通过光刻和刻蚀在二氧化硅衬底上制造微沟槽,然后沉积 As_2S_3 薄膜,通过退火进行薄膜平滑化后,制备得到的波导 TE 偏振模式的传输损耗降至 $0.1\ \text{dB}/\text{cm}$ 。2020 年, Jean 等^[88]采用了类似的无需后处理刻蚀的 $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ 微环谐振腔制备工艺,在衬底上刻蚀好需要的波导结构后沉积 $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$,最后在 N_2/Ar 气体环境下高温退火 120 s 形成低损耗薄膜,微环谐振腔在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的 Q 值高达 6×10^5 。2020 年,澳大利亚国立大学和韩国科学技术研究院(KAIST)研究团队合作先通过刻蚀二氧化硅形成微盘,再通过热蒸发沉积 As_2S_3 薄膜的方式,制备了 Q 值高达 1.44×10^7 的片上硫系微盘谐振腔,这是目前硫系集成光子器件最低损耗的报道^[66]。但这种方式制备的微谐振腔和直波导耦合需要采用空间耦合结构,且

波导截面呈梯形结构,在集成度提升和色散精确控制方面受到限制。

2) 直接在硫系薄膜上加工光波导

研究者发现直接在硫系薄膜上加工光波导^[89]的方法中侧壁粗糙度是造成波导损耗的最主要原因^[40]。因此,通过调整刻蚀气体成分、配比及刻蚀功率、气压等参数是优化硫系玻璃波导结构的刻蚀工艺、降低波导损耗最常用的方法^[90]。首先,研究者通过对比波导形貌控制和表面粗糙度,不断优化化学刻蚀气体的成分和比例。在这个方面,美国麻省理工学院 Hu 研究团队、澳大利亚国立大学 Luther-Davies 研究团队和中国中山大学 Li 研究团队做出了重要贡献。

Hu 等^[91]使用 SF_6 刻蚀制备 $6\ \mu\text{m}$ 宽的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{Se}_{70}$ 波导,在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处测得传输损耗为 $2.3\ \text{dB}/\text{cm}$,通过对比发现 SF_6 比 CHF_3 刻蚀得到的波导侧壁粗糙度更低,损耗更小。2015 年, Chiles 等^[92]采用了氯(Cl_2)等离子体蚀刻法制备低损耗的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{Se}_{70}$ 微环谐振腔, Q 值高达 4.5×10^5 。通过对比 CHF_3 等离子体,他们发现氯等离子体具有高化学反应活性,容易与波导中锗和锑元素形成挥发性化合物,从而获得更低光学损耗。不过,他们也发现 Cl_2 等离子体也会在刻蚀过程与硅、碳、氧反应,进而在波导侧壁形成一层杂质层^[92]。2016 年, Du 等^[93]采用了 Cl_2 和 $\text{CHF}_3 + \text{CF}_4$ 等离子体刻

蚀 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 波导器件, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处获得的传播损耗为 $0.5\ \text{dB/cm}$, 微盘谐振腔的 Q 值达到 1.2×10^6 , 这是当时硫系片上光子器件中最低光学损耗的报道。

因为氟化物气体在刻蚀过程中会在波导的侧壁形成一层碳氟聚合物, 2004年 Ruan 等^[94]采用 CF_4 和 O_2 结合的刻蚀方式制备了波导宽度为 $4\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 的 As_2S_3 脊形波导, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处测得传输损耗为 $0.25\ \text{dB/cm}$ 。为减少碳氟聚合物, 2007年 Madden 等^[95]选择 CHF_3 替代 CF_4 , 降低了氟自由基的浓度, 通过 CHF_3 和 O_2 刻蚀制备了 $22.5\ \text{cm}$ 长的 As_2S_3 波导, 其

在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长处的传播损耗最低为 $0.05\ \text{dB/cm}$ 。

在此基础上, 提升波导侧壁的垂直度可以进一步降低侧壁的粗糙度和减少杂质沉积, 并有利于控制波导色散和耦合效率。2022年中山大学 Xia 等^[53]通过调整 $\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{CF}_4/\text{O}_2$ 气体流量对物理刻蚀和化学刻蚀的程度进行调控, 有效提升侧壁垂直度, 进一步降低侧壁粗糙度, 制备的在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段具有反常色散的 $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ 片上微环谐振腔在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段的 Q 值达到 2.3×10^6 , 为高性能的硫系光子集成器件的线性和非线性应用提供了重要器件。图4为通过干法刻蚀法制备的硫系波导的形貌照片。

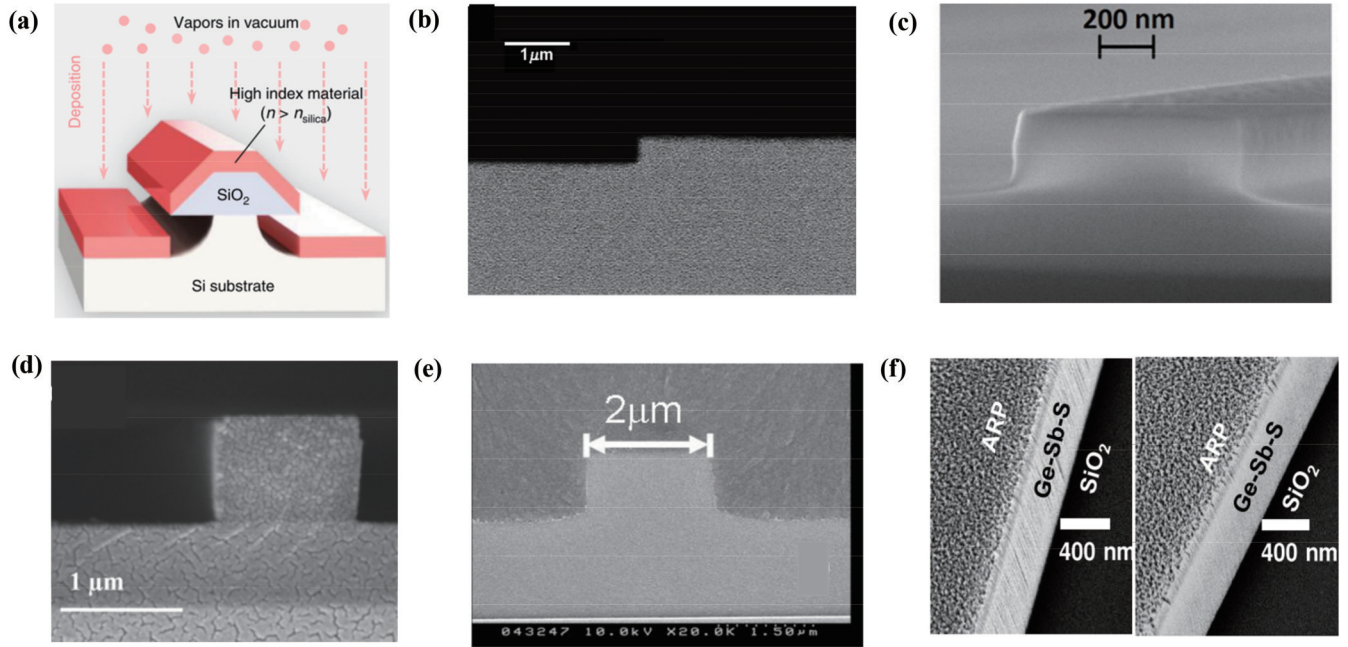


图4 通过干法刻蚀法制备的硫系波导的形貌照片。(a)在 SiO_2 衬底上预先图案化再沉积薄膜形成 As_2S_3 波导的示意图^[66]; (b)采用 SF_6 作为刻蚀气体制备的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 波导 SEM 照片^[91]; (c)采用氯气作为刻蚀气体制备的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 波导 SEM 照片^[92]; (d)用 CHF_3/CF_4 作为刻蚀气体制备的 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 波导扫描电镜照片^[93]; (e)采用 CF_4 结合 O_2 刻蚀形成的 As_2S_3 波导的 SEM 照片^[94]; (f)对比优化 $\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{CF}_4/\text{O}_2$ 气体参数前后 $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ 波导侧壁的 SEM 照片^[53]

Fig. 4 Morphology images of ChG waveguides fabricated by dry-etching method. (a) Schematic of As_2S_3 waveguide pre-patterned and redeposited on SiO_2 substrate^[66]; (b) SEM image of $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ waveguide prepared with SF_6 as etching gas^[91]; (c) SEM image of $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ waveguide prepared with chlorine as etching gas^[92]; (d) SEM image of $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ waveguide prepared with CHF_3/CF_4 as etching gas^[93]; (e) SEM image of As_2S_3 waveguide prepared with CF_4/O_2 as etching gas^[94]; (f) SEM images of $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ waveguide sidewall prepared with and without optimized parameters of $\text{Ar}/\text{CHF}_3/\text{CF}_4/\text{O}_2$ ^[53]

3 硫系集成光子器件及应用

随着硫系光子集成器件加工工艺的不断成熟, 目前已经可以在硅基上实现了一系列高品质的硫系光子集成器件。硫系材料平台具有超大带宽的透过窗口、高克尔非线性和大光弹系数等特点, 在线性和非线性应用领域都获得了广泛的研究。本节将从硫系材料的特点出发, 从线性和非线性器件应用两个方面进行介绍。

3.1 线性光子集成器件及应用

近年来, 硫系光子集成器件被广泛用于如光开关、光分束器、滤波器、模式转换器、偏振控制器等无源器

件的应用研究。与其他材料平台相比, 硫系光子集成器件具有超宽带透光窗口、超快的晶态结构转变、非易失的光致折变和灵活的异质集成等特性。除了应用于高精度中红外传感外, 硫系光子集成器件也是光子信号处理芯片的关键器件, 在超快光开关、可重构光子集成器件和多功能混合集成器件(中红外探测和调制)等方面体现出独特的优势。因此, 本文创新性地根据硫系材料平台的典型材料特点进行分类, 分别综述其在光子信号处理芯片及应用领域的研究进展。

3.1.1 超宽透光窗口

硫系玻璃材料中元素间较弱的化学键和较大的原子质量使硫系材料体现出超宽的透光范围, 包含了光

纤通信波段、3~5 μm 和 8~14 μm 常用的三个光学窗口,因此硫系光子集成器件是实现大工作带宽的片上集成光信号处理的良好平台,在红外激光通信、红外片

上光互连、激光制导等方面具有重要的应用。表 2 和表 3 分别为典型的 1.55 μm 工作波段和中红外工作波段硫系光波导和微谐振腔的参数。

表 2 典型的 1.55 μm 工作波段硫系光波导和微谐振腔的参数Table 2 Parameters of chalcogenide optical waveguide and microresonator at 1.55 μm

Material type	Fabrication method	Refractive index	Dimension	Loss or Q factor
Ge ₂₃ Sb ₇ S ₇₀ waveguide ^[96]	TE RIE	2.18	0.8 μm (width) \times 0.42 μm (height)	0.5 dB·cm ⁻¹
Ge ₂₃ Sb ₇ S ₇₀ microdisk ^[93]	TE RIE	2.22	0.8 μm \times 0.45 μm	1.2 $\times 10^6$
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5} nanowires ^[31]	TE ICP (inductive coupled plasma)-RIE	2.66	0.63 μm \times 0.5 μm	2.6 dB·cm ⁻¹
Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5} microdisk ^[97]	TE RIE	2.545	1 μm height	1.1 $\times 10^6$
Ge ₂₅ Sb ₁₀ S ₆₅ microring ^[67]	TE ICP-RIE	2.2	2.4 μm \times 0.8 μm	1.3 $\times 10^6$
Ge ₂₈ Sb ₁₂ Se ₆₀ microdisk ^[98]	TE ICP	2.8	1 μm height	5 $\times 10^5$
Ge ₂₈ Sb ₁₂ Se ₆₀ microring ^[99]	TE ICP	2.8	0.3 μm height	4.1 $\times 10^5$
As ₂₀ S ₈₀ resonator ^[88]	Micro-trench EBE (electron beam evaporator)	2.1658	2.0 μm \times 1.5 μm	6 $\times 10^5$
As ₂ S ₃ resonator ^[66]	Trapezoidal- TE	2.43	10 μm \times 1.3 μm	1.44 $\times 10^7$
As ₂ S ₃ microring ^[100]	Micro-trench TE	2.45	2.5 μm \times 1.4 μm	4.6 $\times 10^5$

表 3 典型的中红外工作波段硫系光波导和微谐振腔的参数

Table 3 Parameters of chalcogenide optical waveguide and microresonator in mid-infrared band

Wavelength / μm	Material type	Fabrication method	Refractive index	Dimension	Loss or Q factor
3.8-5	Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5} waveguide ^[101]	TE ICP	—	4.0 μm (width) \times 4.4 μm (height)	~0.6 dB·cm ⁻¹
5.2	Ge ₂₃ Sb ₇ S ₇₀ microdisk ^[102]	TE Lift-off	~2.1	3 μm \times 1.3 μm	4 $\times 10^5$
2.5-6.6	Ge _{11.5} As ₂₄ Se _{64.5} waveguide ^[103]	TE ICP	2.609	4 μm \times 1.25 μm	~0.5 dB·cm ⁻¹
2	As ₂ S ₃ waveguide ^[104]	TE ICP	2.42	1.2 μm \times 0.6 μm	1.45 dB·cm ⁻¹
5.2	As ₂ S ₃ microdisk ^[83]	TE Lift-off	2.66	2.5 μm \times 1.1 μm	2 $\times 10^5$
2.4	As ₂ Se ₃ waveguide ^[105]	Sputtering Lift-off	2.79	10 μm \times 1 μm	0.16 dB·cm ⁻¹
8.4	As ₂ Se ₃ waveguide ^[71]	TE Wet etching	2.78	5.4 μm \times 4.53 μm	0.5 dB·cm ⁻¹

2006年,Hô等^[71]在硅基衬底上制备了多层含As硫系玻璃基平面波导结构,在8.4 μm 波长下TE和TM模式的传输损耗分别为0.5 dB/cm和1.1 dB/cm,验证了硫系平面波导在中红外集成光学器件中应用的

可行性。2007年,Hu等^[89]在硅基硫系玻璃薄膜上制备了光子微流控集成器件,在1.55 μm 波段演示了硅基硫系集成光波导的应用。基于两个工作的结果,研究者开始了基于硅基硫系光子集成器件在通信波段以

及中红外波段的光子集成器件的研究。

在 1.55 μm 波段, 2014 年 Li 等^[106] 基于硫族化合物玻璃 (ChG) 材料在塑料基板上的单片光子集成, 实现了一套柔性硫系集成光子器件, 包括波导、微盘谐振腔、滤波器和光子晶体, 该器件具有优异的光学性能和机械灵活性。2018 年, Zhou 等^[107] 制备了折射率更高的 GeSbSe 波导和微环谐振腔, 其在 1550 nm 波导的传输损耗为 2.4 dB/cm, 微环谐振腔的 Q 值为 2.3×10^5 , 波导的非线性折射率 n_2 为 $5.12 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ 。同年, Du 等^[108] 展示了 GeSbSe 材料的片上集成磁光隔离器, 该器件在 1.55 μm 波段具有 3 dB 插入损耗和 40 dB 隔离比。2020 年, Zhu 等^[97] 制备了片上集成的悬浮 GeAsSe 微盘谐振器, 实现的传播损耗降至 0.48 dB/cm, 品质因子达到 1.1×10^6 , 为基于硫系材料的大光弹系数实现片上光声探测提供了高品质微腔。如图 5(a) 所示, 2022 年 Zhou 等^[109] 报道了基于 GeSbSe 材料的集成布拉格光栅, 实现了 0.97 nm 的带宽和 24 dB 的消光比。

目前研究人员在 2 μm 波段开展的研究工作相对较少。2020 年中山大学与上海交通大学研究团队合

作利用在硅基沉积的 As_2S_3 薄膜制造了片上光纤垂直耦合器、布拉格光栅滤波器、3 dB 功率分配器和模式转换器^[104], 并基于上述器件演示了 2 μm 波段的高速片上模分复用 (MDM) 传输, 实现了 $3 \times 80 \text{ Gbit/s}$ 的传输速率, 打破了之前在 2 μm 波段的传输记录。

中外红波段, 被称为“分子指纹区”, 大多数化学键的基本振动模式都位于这个区域。目前在中外红波段开展的硫系片上器件应用演示主要集中在中红外传感领域, 这些工作为制造高品质硫系片上集成光子器件提供了重要依据^[90, 110-111], 如图 5(b)~(h) 所示。2019 年, Su 等^[112] 在硅平台上集成了包含 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 硫系螺旋波导与 PbTe 探测器的片上原位分子探测器件, 在 3.31 μm 波段测得的光学损耗为 8 dB/cm。硅基衬底上氧化硅的传输窗口小于 3 μm , 给硫系波导带来较大的吸收损耗。因此, 研究者提出使用多层硫系薄膜组成复合波导, 减少硫系波导纤芯在中红外波段的光损耗^[83, 113-114]。Lin 等^[83] 在 2013 年制备了硅基 As_2S_3 (纤芯) 和 GeSbS (全包裹包层) 复合波导谐振腔, 在 5.2 μm 波长处测得传播损耗为 0.7 dB/cm, 片上微环谐振腔的 Q 值可达 2×10^5 。

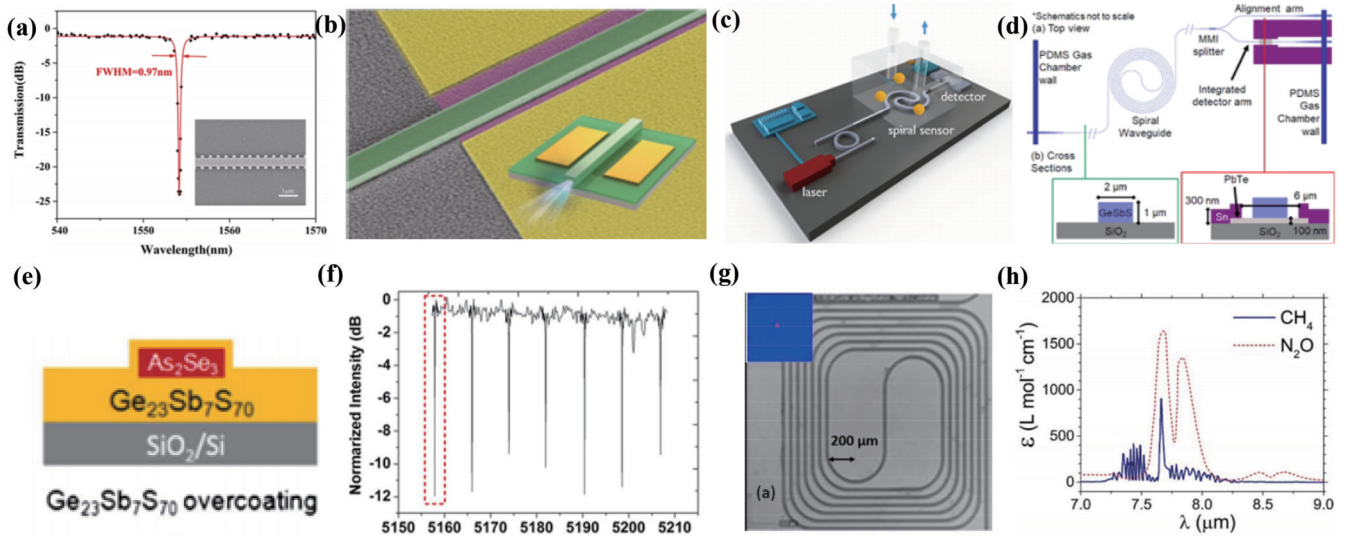


图 5 硫系片上器件在不同波段的应用展示。(a) 1.55 μm 波段的窄带宽硫系布拉格光栅滤波器^[109]; (b) 2 μm 波段石墨烯波导集成探测器^[115]; (c) 3 μm 波段光子气溶胶光谱仪模块的示意图^[116]; (d) 螺旋硫系波导和直接集成在硫系波导下面的 PbTe 的混合集成探测器结构示意图^[112]; As_2S_3 中红外波导的 (e) 横截面示意图和 (f) 中红外透射光谱^[83]; (g) 螺旋状单模硫系波导探测器的显微镜图和 (h) 基于该器件在 7~9 μm 波段探测到的甲烷和氧化二氮的吸收光谱^[117]

Fig. 5 Applications of integrated ChG devices in ultrabroad wavelength regions. (a) Narrow bandwidth Bragg grating filter based on chalcogenide glass in 1.55 μm band^[109]; (b) graphene waveguide integrated detector in 2 μm band^[115]; (c) schematic of photon aerosol spectrometer module in 3 μm band^[116]; (d) schematic of hybrid integrated detector based on spiral chalcogenide waveguide and PbTe film directly integrated under chalcogenide waveguide^[112]; (e) cross-section structure and (f) transmission spectrum of As_2S_3 waveguides in mid-infrared band^[83]; (g) optical microscope image of spiral single-mode ChG waveguide detector and (h) absorption spectra of methane and nitrous oxide based on device in 7~9 μm wavelength region^[117]

3.1.2 超快的分子结构转变

某些硫系材料在外部热刺激下表现出快速、可逆的非晶态-晶态之间的相变特性, 被称为硫系相变材料, 如 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST)、 Sb_2S_3 等。不同相态下的硫系材料薄膜具有巨大的光学常数

差异, 基于这类硫系材料的光子器件可以快速改变光的振幅和相位, 从而广泛应用于光开关、光存储和光计算的应用研究。与之前电阻型器件相比, 这类硫系材料的光子集成器件具有非易失性、消光比大、开关速度快等特点, 有利于实现低功耗的光子链路, 为新一代的

光网络系统的发展提供了重要器件支撑。目前这类研究主要利用了以下特性。

1) 利用硫系相变材料快速相态转变特性制备高速光开关器件。如图6(a)所示,2014年,Rios等^[118]在 Si_3N_4 跑道环谐振腔局部覆盖了一层硫系相变材料GST薄膜,组成集成的光开关,并通过ITO快速加热GST,在光通信C波段内演示了超快的光开关功能。2018年,Zheng等^[119]在硅基微环谐振腔局部覆盖一层GST,组成集成光开关器件。通过脉冲激光加热GST,在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段内实现了约为33 dB的消光比。该课题组在2019年进一步通过实验验证了该器件性能,通过器件顶部的ITO电加热,实现了带宽大于58 nm、微秒级响应的光开关^[120]。2019年,Xu等^[121]基于非对称定向耦合器设计和制备了由GST包层和硅波导组成的 1×2 和 2×2 光开关,通过在 $200\ ^\circ\text{C}$ 下对器件进行快速热退火,在光通信C波段实现了超紧凑($30\ \mu\text{m}$)插损约为1 dB、串扰小于-10 dB的硅基光开关。GST材料晶态的消光系数比非晶态的要高2~3个量级,这也导致晶态的GST体现出较大的光学损耗,限制了GST在光子集成器件中的应用。美国MIT的Hu课题组在GST材料基础上利用Se原子部分代替Te原子得到GSST材料。GSST在维持晶态和非晶态具有高折射率差的同时极大地减小了晶态的消光系数。如图6(b)所示,2017年该课题组^[122]利用在氮化硅波导上覆盖的GSST薄膜组成非对称MZI结构的 2×2 光开关,在光通信C波段实现的插入损耗小于0.4 dB,串扰小于-15 dB。2019年,该课题组^[123]利用在氮化硅微环谐振腔上覆盖的GSST薄膜组成集成微腔光开关,实现42 dB的消光比和小于0.5 dB的插入损耗,还演示了基于电热开关的像素级自由空间反射调制,展示了相变材料GSST在可调谐光子集成器件中的应用潜力。2021年,该课题组^[124]进一步展示了基于GSST的电控可调谐集成超表面器件,通过解决电极热调谐带来的温度分布不均匀问题,实现了准连续调谐反射型光开关和偏转角度为 32° 的空间反射光束转换。2022年,Zhu等^[125]使用GSST实现了工作在光通信C波段的紧凑非易失性的偏振旋转光开关,实现了0.33 dB的低插入损耗、开关深度超过34.2 dB和超过100 nm的工作带宽,如图6(c)所示。

2) 利用硫系相变材料晶态与非晶态之间存在多种中间态的特点,通过精确控制相变材料的结晶程度实现多级光存储和光计算的应用演示^[8,126-128]。2012年,Pernice等^[126]提出通过控制GST的晶化比例可以持续调制光子集成器件的传输特性,实现了集成光路中的多级光存储过程演示。2015年,Rios等^[127]通过实验验证了该器件作为多级光存储期的可行性,演示了一种快速、可重复的8级多位非易失性光子存储器,如图6(d)所示。基于内存计算的原理,研究人员利用硫系相变集成波导实现了光学内存计算,分布演示了标量-标量乘法、矢量矩阵乘法^[128]和使用卷积神经网络(CNN)执行图像处理和数字分类的集成光学张量核心^[8],如

图6(e)和(f)所示。

3) 上述应用主要是利用相变材料相态之间折射率的实部变化来验证其光子集成器件功能,但很少有对其折射率的虚部(损耗)变化进行的应用研究。2021年,中山大学Zhang等^[129]提出利用相变材料 Sb_2S_3 的相态间折射率虚部(损耗)变化来控制对称耦合的一对片上集成微环谐振腔之间的耦合状态,实现了对光子的快速捕捉和释放,其可用于高速光存储或光计算,如图6(g)所示。

3.1.3 非易失的光致折变

硫系玻璃材料在被强光照射后会表现出很强的光致折变性能(折射率变化高达0.04),而且与铌酸锂材料不同的是,当撤去强光后硫系材料光致折变不会消失,即具有非易失性^[130-131]。早期,研究人员主要是利用其光致折变特性通过材料带隙波长的激光直写的方式在硫系薄膜中实现各类光子器件的灵活、可控制备,如单模光波导、耦合器^[132]、高品质微谐振腔^[133]、布拉格光栅^[134],如图7所示。

2010年,Hu等^[135]在 As_2S_3 基微环谐振腔中观察到 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长激光仍可以使硫系材料发生光致折变,并通过控制泵浦功率和泵浦时间,利用光致折变效应实现微腔谐振频率的精确调谐,该研究开启了光致折变在硫系微谐振腔器件中的应用。2020年,Shen等^[136]利用微谐振腔内形成的驻波通过光致折变效应在集成的微谐振腔内诱导形成等周期的光栅,如图8(a)~(d)所示,并通过控制泵浦光功率和光照时间调谐光栅周期,调制谐振峰的劈裂宽度,并通过带隙光照微腔消除光栅,实现了可重构光子集成微腔器件。同年,Zhu等^[137]利用相同原理在品质因子达 10^7 的 As_2S_3 微球谐振腔中实现了光栅的写入,他们提出利用非线性效应可以使驻波产生对称性破缺,使用与“写入”相同波长的激光可实现腔内光栅的“擦除”,如图8(e)所示。

这些研究结果都为实现可重构集成光子器件提供了非常有价值的依据。

3.1.4 灵活的异质集成

硫系玻璃的非晶体材料特性使其具有良好的薄膜成膜性,并且不需要表面修饰,可以在低温($<350\ ^\circ\text{C}$)条件下沉积在晶体(硅^[53]、氟化钙^[138]、铌酸锂^[139]、二维材料薄膜^[115])或非晶体(聚合物^[106])衬底上,因此体现出灵活的异质集成特性,为异质异型的多功能集成的光子器件制备提供了有利条件。

1) 硫系薄膜直接沉积在铌酸锂、氟化物晶体平台上

2010年,Xia等^[140]研究了在铌酸锂衬底上制备低损耗的 As_2S_3 波导,并在 $4.8\ \mu\text{m}$ 波长处测得波导传输损耗低至0.33 dB/cm。2015年,Rao等^[139]利用硫系玻璃 $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_7\text{S}_{70}$ 和铌酸锂混合集成的脊形波导,在光通信C波段演示了微环调制器和马赫-曾德尔(MZI)调制器。如图9(a)所示,通过在波导顶部设置金电极对铌酸锂进行调制,分别在 Q 为 1.2×10^5 的硫系微环调制

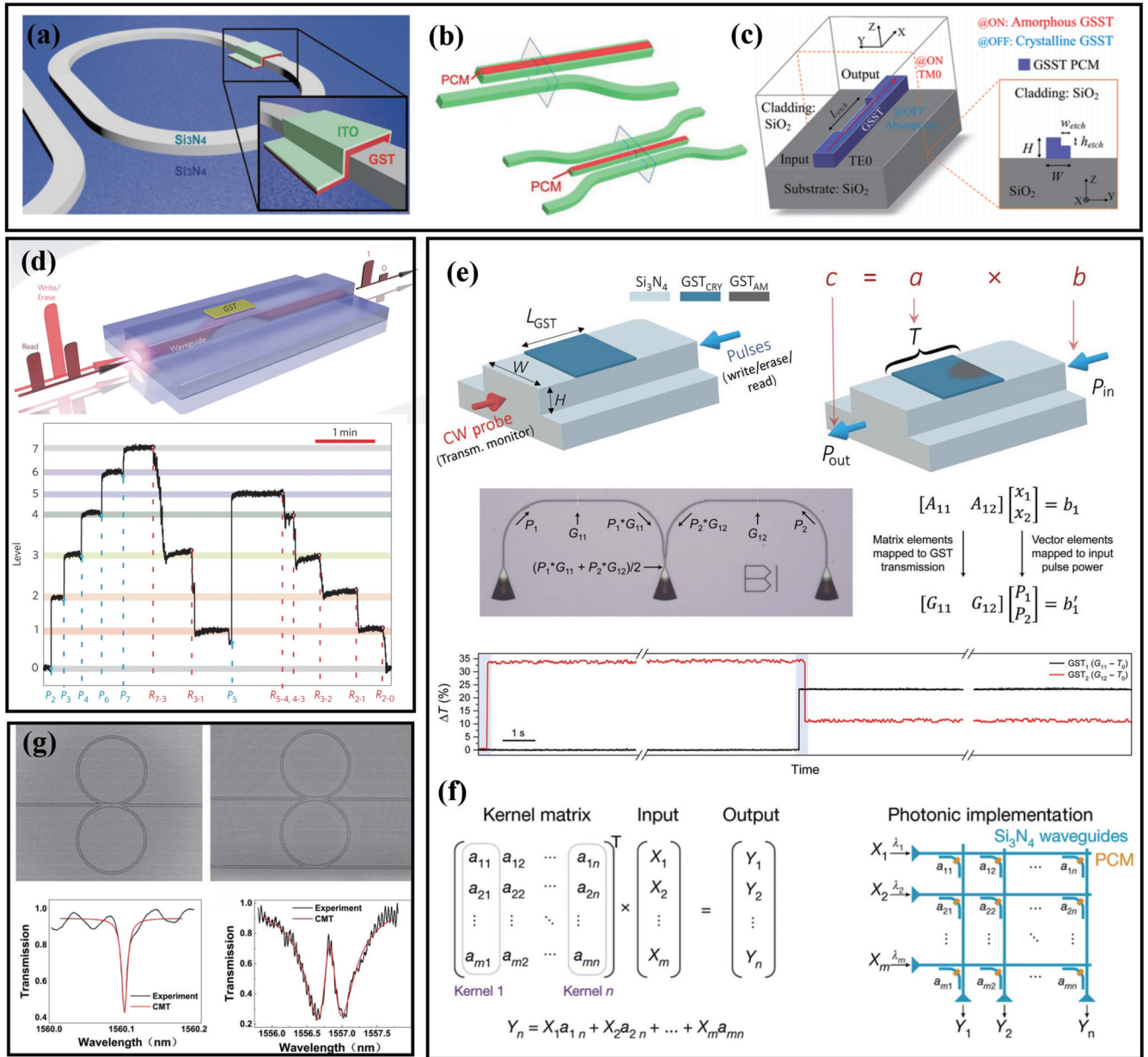


图6 硫系相变材料基光子集成器件的应用。(a)基于 Si_3N_4 微腔和GST的光开关^[118]；(b) 1×2 和 2×2 的相变材料基光开关^[122]；(c)基于GSST的偏振旋转光开关^[125]；(d)全光片上存储器装置的工作原理和多级信号处理^[127]；(e)基于GST的光子记忆单元和矩阵向量乘法的光子结构^[128]；(f)用于卷积运算的光子张量核^[8]；(g)对称和非对称微环谐振器结构的光开关^[129]

Fig. 6 Applications of ChG phase change material-based photonic integrated devices. (a) Optical switch based on Si_3N_4 microresonator and GST^[118]; (b) 1×2 and 2×2 phase change material-based optical switches^[122]; (c) GSST based polarization rotary optical switch^[125]; (d) working principle and multi-level signal processing of all-optical on-chip memory device^[127]; (e) GST based photonic memory cell and photonic structure of matrix-vector multiplication^[128]; (f) photonic tensor cores for convolution operations^[8]; (g) optical switches based on symmetric and asymmetric microring resonators^[129]

器实现 0.4 GHz/V 的调谐率、13 dB 的消光比，在 6 mm 长的 MZI 调制器中实现 $3.8 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 的半波电压长度乘积、15 dB 的消光比。2016 年，Macik 等^[141]在铌酸锂衬底上沉积并刻蚀了 1×8 的高折射率 As_2S_3 波导阵列，如图 9(b) 所示，形成工作波段在 $1.55 \mu\text{m}$ 的垂直集成的光学相控阵列，其器件传输损耗低至 1.8 dB/cm ，证实了 $\text{LiNO}_3\text{-As}_2\text{S}_3$ 平台具有超过 10 GHz 调制速率的潜力。2018 年，Zhang 等^[142]在铌酸锂基板

上设计了 As_2S_3 光栅耦合器，其中硫化砷波导的传输损耗为 2 dB/cm ，光栅耦合器和单模光纤在 1540 nm 处的耦合效率达到了 23.4%。2020 年 Khan 等^[143]在 Y 切的铌酸锂上异质集成了 As_2S_3 薄膜，在 $\text{As}_2\text{S}_3\text{-氧化硅-铌酸锂}$ 混合波导平台上证实了基于 MZI 结构的声光调制器，实现了半波电压长度积为 $0.94 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 的调制效率。2022 年，Wan 等^[144]提出在 X 切薄膜铌酸锂上直接异质集成硫系薄膜的混合波导结构，结合硫系材料

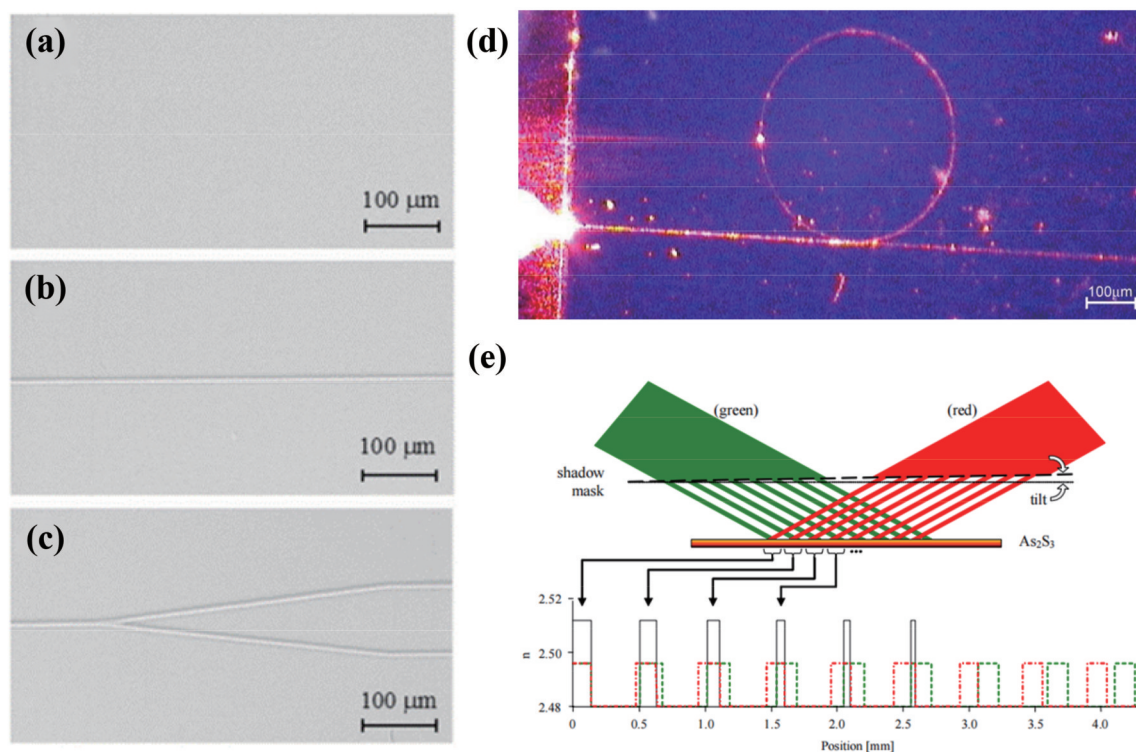


图 7 激光直写法制备硫系光波导的结果^[132]。硫系薄膜中(a)未曝光区域、(b)单根直波导和(c)Y型耦合器的光学显微镜照片；(d)环形谐振腔的光学显微镜俯视图^[133]；(e)荫罩错位干涉方法制备布拉格光栅的示意图^[134]

Fig. 7 Results of ChG optical waveguides fabricated by laser direct writing method^[132]. Optical microscope images of (a) unexposed area, (b) single straight waveguide, and (c) Y-coupler on ChG film; (d) top view of microring resonator obtained by optical microscope^[133]; (e) fabrication schematic of optical Bragg grating through interference caused by dislocation of shadow masks^[134]

强光弹性效应与反对称的声表面波模式分布,实现了推挽式MZI型声光调制器[图9(c)],在非悬浮状态下展现了低至 $0.03 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 的调制效率。相比同类型薄膜铌酸锂声光调制器,该器件在调制效率方面获得了一个数量级的提升。

2021年,Pi等^[145]通过剥离法在 MgF_2 晶体上制备了1 cm长的片上 GeAsS 波导,采用波长调制光谱探测技术进行二氧化碳(CO_2)气体检测,检测波长为 4319 nm (波数为 2315.2 cm^{-1}),检测下限低至 0.3% 。这些工作都验证了硫系玻璃与其他材料平台混合集成的潜力。

2)在硅基平台上实现硫系材料与二维材料(石墨烯、二硫化钼、黑磷、硒化铟、六方氮化硼、碲烯)的混合异质集成器件

2017年Lin等^[145]结合硫系材料的大带宽工作窗口、热光特性和二维材料优异的电学和导热特性,演示了硫系混合光子集成器件在非易失性光开关、偏振控制器、中红外调制器、中红外探测器等方面的应用潜力和优势。2021年,Rios等^[146]制备了石墨烯和硫系材料GSST异质集成的微环谐振腔,并在光通信C波段演示了高速且非易失性的光开关功能。2018年,该课题组^[147]演示了基于黑磷和中红外 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 硫系波导混合集成的中红外光电探测器[图9(d)],在 2185 nm 波长实现的最佳响应率高达 $40 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$,噪声等效功率低至 $30 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。2019年,该课题组^[148]采用了新

型的二维材料碲烯(tellurene)和硫系波导组成在室温下具有极低噪声的集成光电探测器和高速调制器[图9(e)]。相比其他二维材料,碲烯材料具有更低且可调的带隙能量、低的门控载流子浓度、高的载流子迁移率和大的电光活性特性,因此,该工作在 $3 \mu\text{m}$ 波长实现了室温等效噪声功率为 $0.03 \text{ fW} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的光电探测器和半波电压长度积为 $2.7 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 、开关能量为 12 pJ/bit 的调制器,目前该结果是同类型器件相同参数中的最佳结果^[148]。

硫系玻璃材料具有宽透明窗口、高速相态转变、非易失的光致折变、易于异质集成等特点,在大带宽、可重构和低功耗光子集成器件应用中具有显著的优势。近年来,随着硫系集成光子器件的微纳加工工艺不断成熟,越来越多的线性光子集成器件被开发,并演示了其在宽带光开关、耦合器、中红外探测器和调制器等方面的应用潜力。随着商品化的中红外波段的激光器、探测器、光谱仪性能不断提升,实际应用中高品质中红外波段的光子集成器件需求越来越多,硫系光子集成器件的优势也就会得到更多的验证和认可。

3.2 非线性光子集成器件及应用

3.2.1 光学参量非线性效应

硫系玻璃材料具有较高的线性、非线性折射率以及灵活的色散调控性质,十分有利于实现基于光学参量过程的非线性应用^[19,149]。对于参量非线性过程来说,非线性效应的强弱可以通过非线性系数

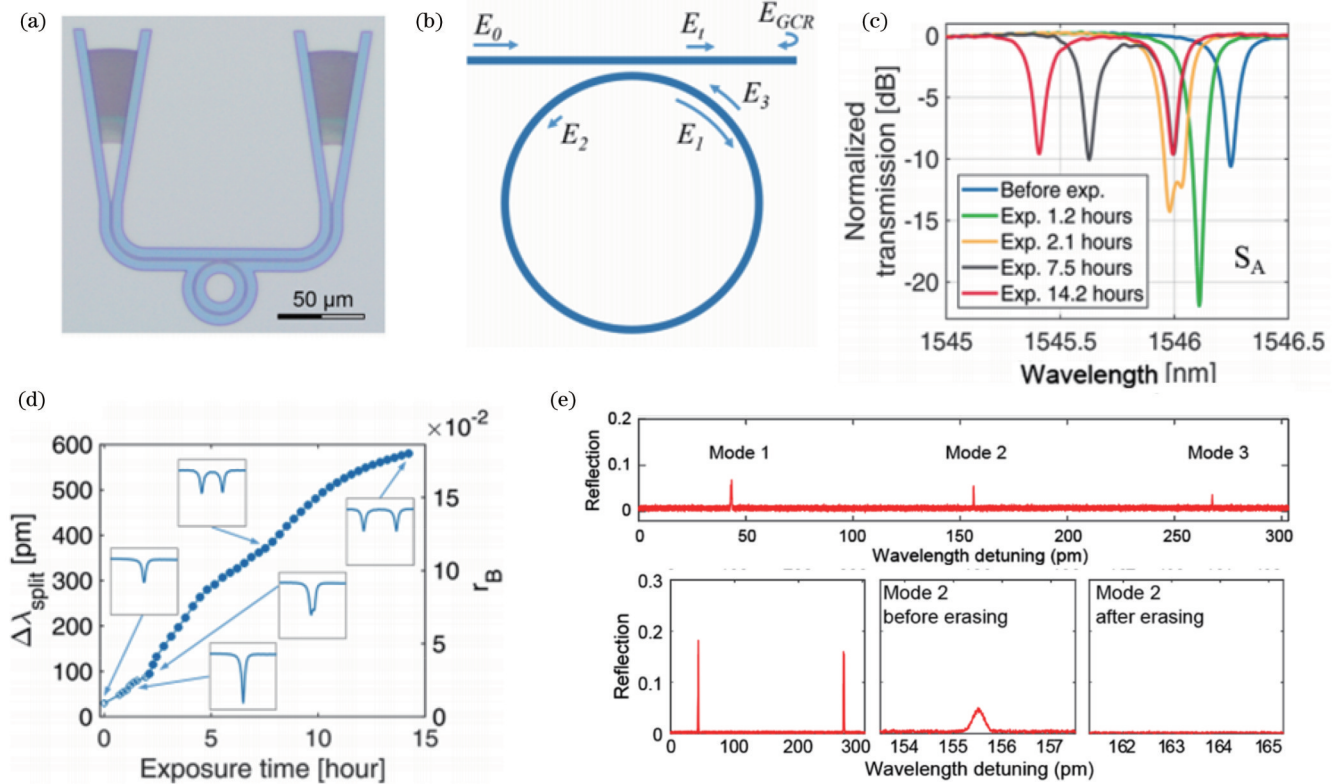


图 8 光致折变导致硫系片上微谐振腔中模式劈裂的研究结果^[136]。(a)微环谐振腔的光学显微镜照片;(b)在硫系微环中写入布拉格光栅的原理示意图;(c)不同照射时间导致的模式劈裂结果;(d)模式劈裂宽度 $\Delta\lambda_{\text{split}}$ 和对应的布拉格光栅反射率 r_B 随曝光时间的变化曲线;(e)利用光致折变在 As_2S_3 微腔中“写入”和“擦除”选择模式的反射光谱结果^[137](上图包含三种模式的反射谱,左下方图为擦除模式 2 后的反射谱,下方中间图为擦除模式 2 前的局部反射谱,右下方图为擦除模式 2 后的局部反射谱)

Fig. 8 Results of mode splitting caused by photorefractive in ChG microresonators^[136]. (a) Optical microscope image of ChG microresonator; (b) schematic of Bragg grating in ChG microresonator; (c) pattern splitting results caused by different irradiation time; (d) variation curves of mode splitting width $\Delta\lambda_{\text{split}}$ and corresponding Bragg grating reflectivity r_B with exposure time; (e) reflection spectra of "writing" and "erasing" selected mode in As_2S_3 microcavity based on photoinduced refractive index variation^[137] (upper image is reflection spectrum including three modes, lower left image is reflection spectrum of three modes after erasing mode 2, lower middle image is local reflection spectrum before erasing mode 2, and lower right image is local reflection spectrum after erasing mode 2)

$\gamma = \omega n_2 / (cA_{\text{eff}})$ 来表征,其中 ω 是光波角频率, n_2 为非线性折射率, A_{eff} 是传输模式的有效模场面积。相比光纤来说,片上硫系光波导可以实现更小的尺寸,获得更小的模场面积,从而实现更大的非线性系数。目前报道的 As_2S_3 波导的非线性系数约为 $9.9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[150],在具有更高非线性折射率的 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 纳米线波导中非线性系数则达到了 $136 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[31],不含 As 的环境友好的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 光波导的非线性系数达到了 $110 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[99]。

近年来,研究人员基于高非线性硫系集成光波导实现了多种高性能的全光信号处理技术,包括全光再生、波长转换等^[151-153]。如图 10 所示,Vo 等^[154]展示了一种基于硫系波导的典型高速全光信号处理系统。该光波导的长度约为 7 cm,芯层为脊形 As_2S_3 波导,包层和基底分别为聚合物和氧化硅[图 10(a)]。首先通过仿真发现该波导的 TM_{00} 模式在通信波段具有反常色散,满足实现四波混频效应的相位匹配条件[图 10

(b)]。图 10(c)展示了所涉及的全光时分复用技术的系统图, As_2S_3 波导在该系统中的发射端提供了高效的交叉相位调制效应,在接收端则提供了具有高转化效率(约 60%)的四波混频效应,从而能够将 128 个基础带宽为 10 Gbit/s 的 300 fs 脉冲信号进行交叉存取,从而得到 1.28 Tbit/s 的单信号带宽。2020 年,Zeng 等^[155]制备了品质因子超过 1×10^6 的 GeAsS 微环谐振腔,基于微腔固有的滤波特性和参量非线性效应,他们在泵浦功率约为 10 mW 时实现了窄带光参量放大,这种窄带高增益的参量放大器可以在相干光通信系统提取传输数据中的载波信号,作为本地振荡器,实现载波恢复。

基于低损耗的硫系光波导实现宽带超连续光谱也获得了深入研究^[156-157],目前可以通过实验产生覆盖近红外到 10 μm 波段的超连续激光输出^[113]。相比高非线性光纤,片上光波导的损耗还较大,用于产生超连续光谱的光波导长度只有几厘米或亚厘米长度,这就需要较高的激光泵浦功率,因此一般都会采用尺寸较大、

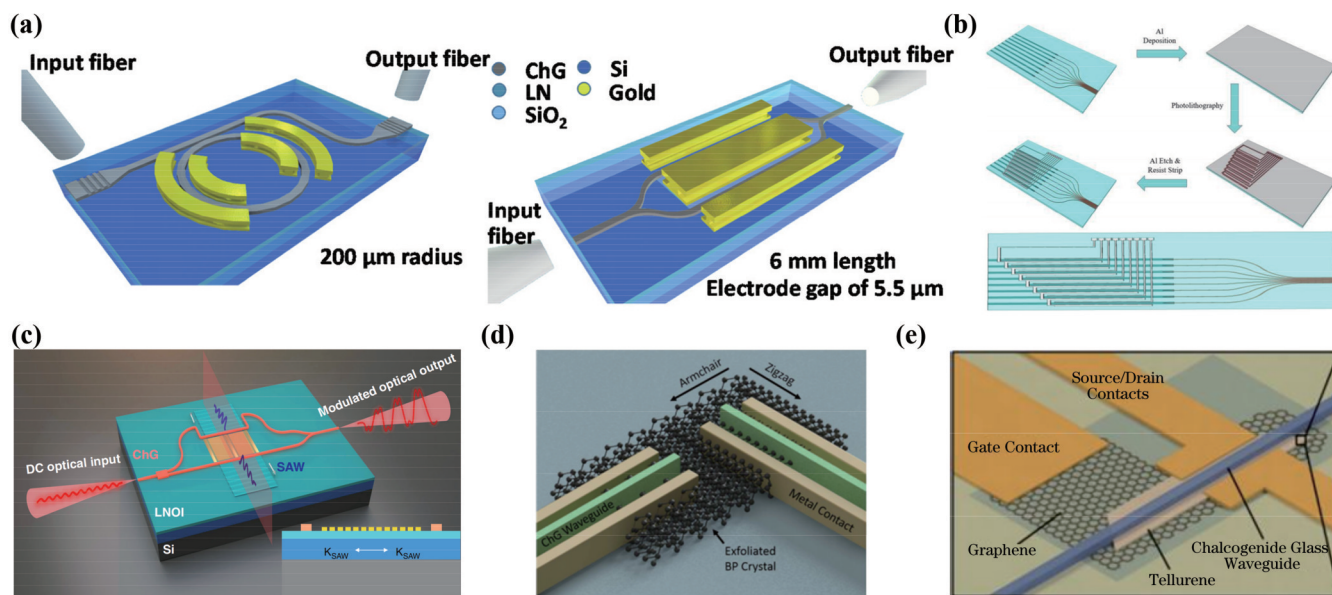


图9 硫系基混合集成光子器件。(a)硫系玻璃和铌酸锂混合集成的微环调制器和MZI调制器^[139]；(b)铌酸锂衬底上的As₂S₃垂直集成的光学相控阵列^[141]；(c)铌酸锂/GeSbS复合MZI结构的声光调制器^[144]；(d)GeSbSe波导集成的黑磷光电探测器^[147]；(e)含硫系波导和碲烯的混合集成探测器^[148]

Fig. 9 Hybrid integrated ChG-based devices. (a) ChG and lithium niobate hybrid integrated microring modulator and MZI modulator^[139]; (b) As₂S₃ vertically integrated optical phased array on lithium niobate substrate^[141]; (c) acoustooptic modulator with lithium niobate/GeSbS hybrid integrated MZI structure^[144]; (d) GeSbSe waveguide integrated black phosphorus photodetector^[147]; (e) hybrid integrated photodetector based on ChG waveguide and tellurene^[148]

价格昂贵的飞秒脉冲激光。这对于基于集成光波导产生的超连续光源而言,器件耦合效率、集成化和稳定性都受到一定限制。

高品质因子的片上微环谐振腔具有显著的光场增强效应,能够大幅度降低参量非线性过程所需的泵浦阈值。因此,同时具有高品质因子和灵活调控的群速度色散的集成微腔是获得高效的参量非线性效应的基础。2021年,Zhang等^[30]在As₂S₃硫系片上微环谐振腔中实现了低阈值的非线性参量振荡,该微环谐振腔的本征品质因子高达 1.33×10^6 ,且对应的TM₀₀模式在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近具有反常色散,测得的参量振荡功率阈值约为 5.4 mW ,如图11(a)、(b)所示。该结果表明硫系片上的微环谐振腔可提供克服微腔损耗的净参量增益,可实现超过0 dB的四波混频转化效率,也利于未来实现基于参量非线性过程的克尔微腔光梳。2021年,Jiang等^[158]制备了本征品质因子约为 3.0×10^5 的Ge_{11.5}As₂₄Se_{64.5}硫系微环谐振腔,该微环谐振腔的TE₀₀模式具有反常色散($1.55 \mu\text{m}$ 附近)。他们利用该微腔的大非线性系数和强场增强效应进一步展示了基于四波混频效应的波长转化过程,在泵浦功率仅为 $63.85 \mu\text{W}$ 时获得了一33.7 dB的波长转化效率,如图11(c)、(d)所示。

基于微腔中的参量非线性过程实现微腔克尔微梳是目前非线性光学领域的研究热点。光学集成微腔具有高品质因子和场增强效应,可以将微腔光频梳的产生阈值降低至毫瓦量级,进而显著减小产生光学频率梳所需的体积和功耗,推动光学频率梳规模化实际应

用^[113,159-160]。中山大学研究团队基于硫系集成光子微腔在集成微梳产生和调控方面进行了一系列的研究。2020年,该研究团队在实现了低阈值参量振荡的As₂S₃微环谐振腔基础上进一步改进了材料体系,选用了化学性质更加稳定且具有较高激光损伤阈值的三元组分GeAsS硫系材料制备了微环谐振腔,该微腔的品质因子达到 5×10^5 。微腔的TM₀₀模式在通信波段具有反常色散,他们首次展示了基于硫系微腔的克尔光频梳产生,但产生的频梳未实现锁模,相干性较差^[161]。此后,他们进一步替换了砷元素,开发了具有更高的激光损伤阈值和玻璃转化温度的GeSbS体系,相较于GeAsS体系,GeSbS体系无毒、稳定,与CMOS制备工艺兼容性也更好^[162]。通过精确色散设计和控制微腔的尺寸,该团队展示了基于GeSbS硫系集成微腔的锁模孤子微梳和宽带拉曼-克尔微梳。图12展示了在GeSbS硫系微腔中实现光学微梳的代表性结果^[53,67]。通过灵活的色散调控,该微腔的TM₀₀模式和TE₀₀模式分别具有反常色散和正常色散,所制备的光学微腔的两种模式的本征品质因子均超过 2×10^6 。他们在同一个微环谐振腔通过泵浦不同的偏振态分别实现亮孤子微梳和暗脉冲微梳的产生,如图12(b)和(c)所示。由于具有高的品质因子和高非线性,两种微梳的产生功率都约为20 mW,这对于实现全片集成片上光梳的产生和应用具有重要意义。同年,他们还通过调控色散工程在硫系微腔中实现了克尔非线性和拉曼效应的相互作用的调制,从而实现了宽带克尔-拉曼微梳,增大了集成微梳的输出带宽,如图12(d)所示。这一系列

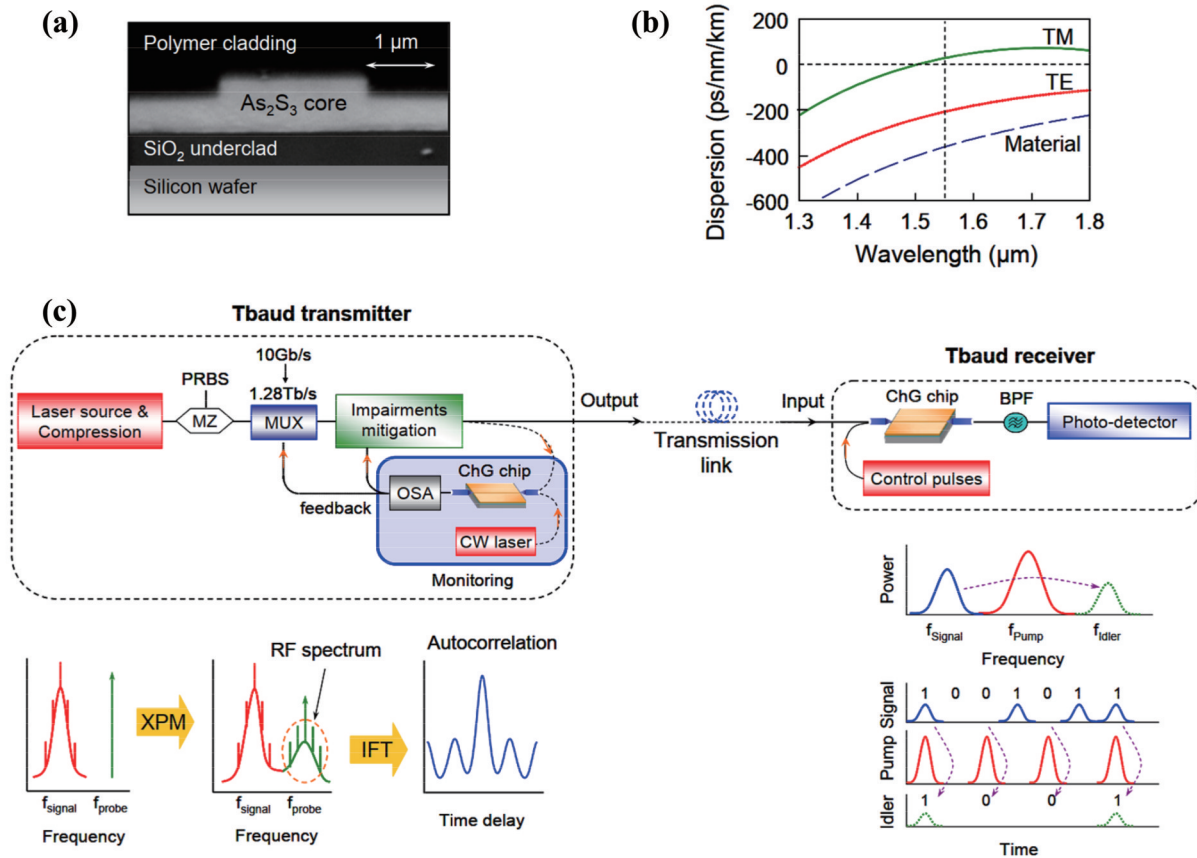


图 10 用于全光信号处理的硫系波导及系统^[154]。(a) As_2S_3 波导截面示意图;(b)仿真计算的片上波导的TE模式、TM模式的群速度色散和材料色散;(c) Tbit/s带宽信号发射端优化和解复用时分复用信号接收端系统及原理示意图
Fig. 10 ChG waveguides and systems for all-optical signal processing^[154]. (a) Cross section of As_2S_3 planar waveguide; (b) simulated group velocity dispersion of TE and TM modes and material dispersion of on-chip waveguide; (c) principle diagrams of transmitter optimization of Tbit/s bandwidth signal and demultiplexing time division multiplexing signal receiver system

的实验结果表明利用硫系玻璃的高非线性特性和灵活的色散控制,可以在硫系集成微腔中产生多样化的集成微梳。而且,结合硫系材料在中红外波段的低光学损耗和高非线性优势,硫系集成光子器件为发展近红外到中红外的微腔光频梳技术和应用提供了重要基础。

3.2.2 受激布里渊散射效应

受激布里渊散射(SBS)是介质中光波与弹性声波之间的相互作用产生的非线性光散射现象,当入射光(频率为 ω)强度达到一定值时,光波会在介质中产生电磁伸缩效应,产生在介质内前向传播的相干声波(频率为 ω_s)和向后散射传播的散射光波(频率为 $\omega - \omega_s$)(称为斯托克斯光)。声波频率 ω_s 一般在GHz范围,因此受激布里渊散射连接了光学和微波学,在微波光子学领域发挥了重要作用。受激布里渊散射主要决定于布里渊增益系数与介质材料,与介质材料的弹光系数和声学模式约束能力有关。硫系光学波导具有高的折射率、较大的布里渊增益系数、低传输损耗,与低折射率、硬介质包层相结合可以实现对光学模式和声学模式的同时束缚,是实现高性能受激布里渊散射效应的理想器件。

表4和图13总结了基于硫系集成光波导实现受激

布里渊高增益的代表性成果。可以看出,在光子集成器件中首次观测到受激布里渊散射效应是在 As_2S_3 脊形波导中实现的^[163]。2011年,悉尼大学和澳大利亚国立大学研究团队Pant等制备了长度为7 cm、包层为 SiO_2 的 As_2S_3 脊形波导,在泵浦功率为300 mW时斯托克斯光的增益达到了16 dB,对应的布里渊增益系数为 0.7×10^{-9} m/W,是普通单模光纤的100倍。此后,该研究团队一直致力于基于硫系集成波导的布里渊增益性能的提升。2017年,他们优化了波导结构,增强了声光相互作用,并将波导长度增加至23 cm,当泵浦功率为350 mW时实现的布里渊开关增益为52 dB,这是目前集成光波导中布里渊增益的最高值,其结果如图13(b)所示^[164]。同年,该团队Morrison等^[165]进一步开发了 As_2S_3 波导与硅波导的混合集成波导[图13(c)],在180 mW的泵浦功率下,该混合器件所实现的布里渊开关增益为22.4 dB。该器件同时利用了成熟的硅基集成技术和硫系材料的大布里渊增益系数,为实现全集成布里渊增益器件及其实际应用铺平了道路。2021年,Liu等^[166]在硅基 As_2S_3 集成光波导中展示了模间的布里渊散射效应,在该波导中验证了基模泵浦产生高阶模布里渊增益的可行性,在光子集成器件中不需要额外的非互易器件(如环形器)即可实现泵浦

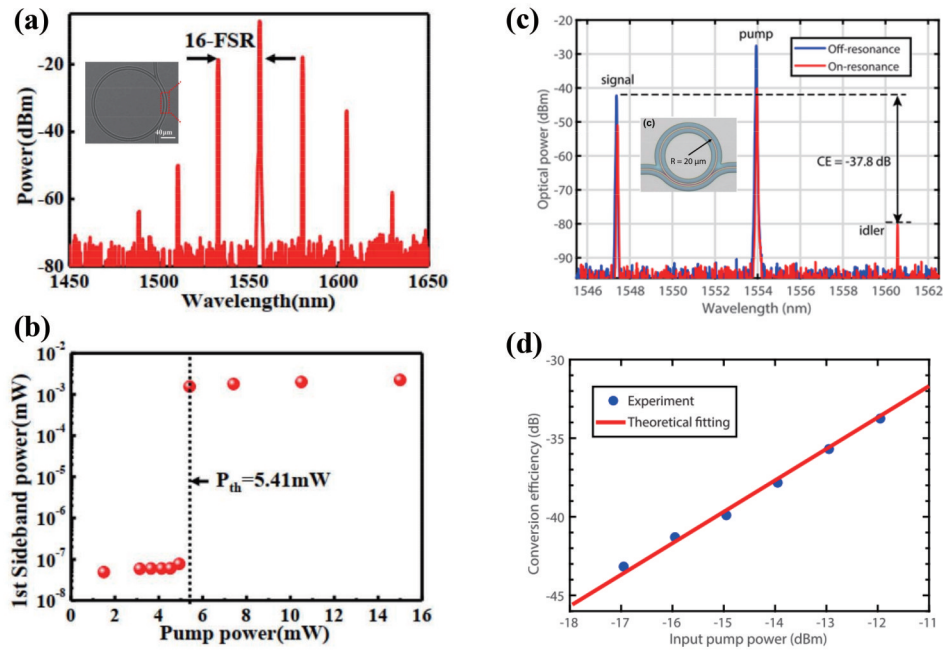


图 11 硫系集成微腔在光学参量振荡应用方面的结果。(a)基于 As_2S_3 微环谐振腔的光参量振荡^[30]；(b)测试的光参量振荡阈值功率(约为 5.4 mW)^[30]；(c)基于 $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ 微环谐振腔的四波混频效应^[158]；(d)测试得到的四波混频转化效率和输入泵浦功率的关系^[158]

Fig. 11 Results of ChG integrated microresonators in optical parametric oscillation applications. (a) Optical parametric oscillation based on As_2S_3 microring resonators^[30]; (b) measured threshold power of optical parametric oscillation process (about 5.4 mW)^[30]; (c) four-wave mixing effect based on $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ microring resonators^[158]; (d) measured conversion efficiency of four wave mixing as a function of input pump power^[158]

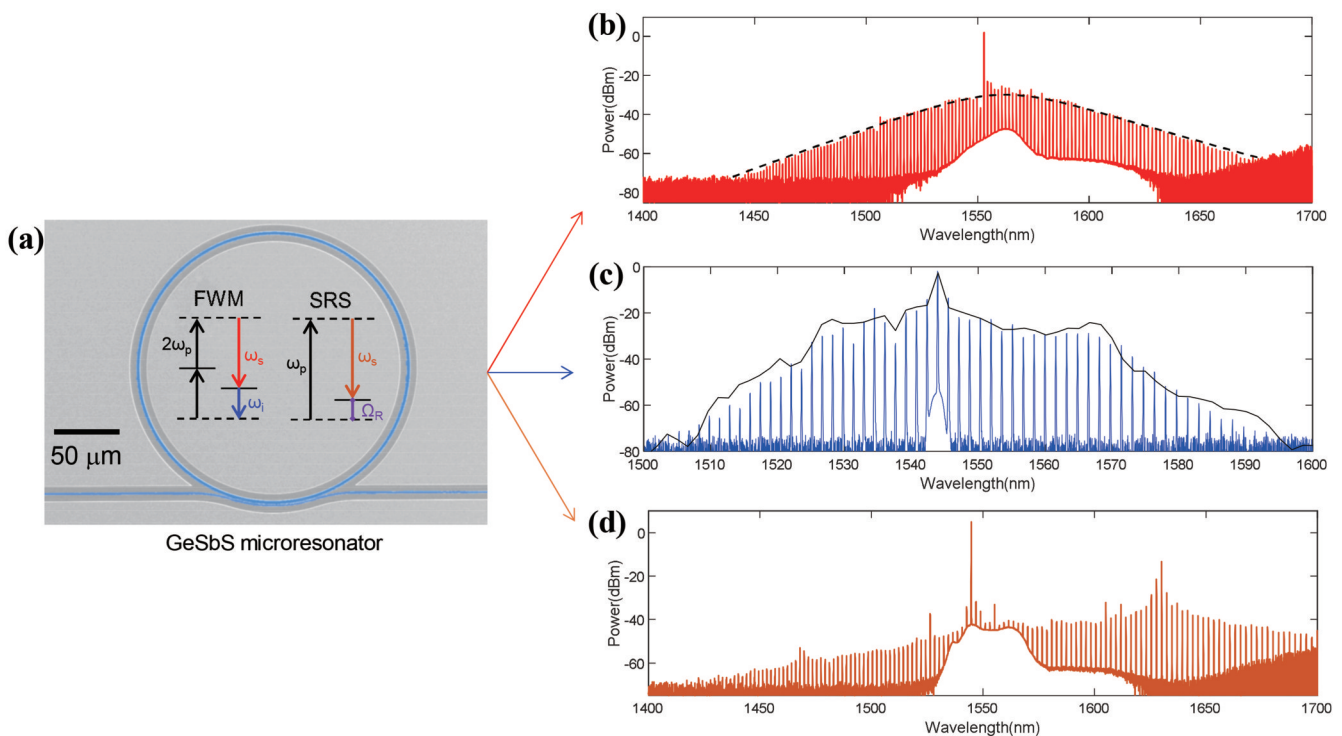


图 12 硫系集成微腔在光学频梳应用方面的结果^[53,67]。(a) GeSbS 微环谐振腔的扫描电子显微镜图；(b)亮孤子微梳；(c)暗脉冲微梳；(d)克尔-拉曼微梳

Fig. 12 Results of ChG integrated microresonators in optical frequency comb applications^[53,67]. (a) SEM of GeSbS microresonator; (b) bright soliton microcomb; (c) dark-pulse microcomb; (d) Raman-Kerr microcomb

光和斯托克斯光的分离,这利于实现全集成化的布里渊光子处理芯片。2022年,Lai等^[167]设计并制备了高掺杂 SiO₂/As₂S₃混合集成波导,其结构如图 13(e)所示,该波导可与商用的高数值孔径光纤实现高效耦合,

显著降低端面损耗和反射,集成光波导的端面耦合损耗低至单端 0.85 dB,在泵浦光功率为 158 mW 时得到 23 dB 的布里渊开关增益,这促进了高性能布里渊集成光子器件的封装和实际应用。

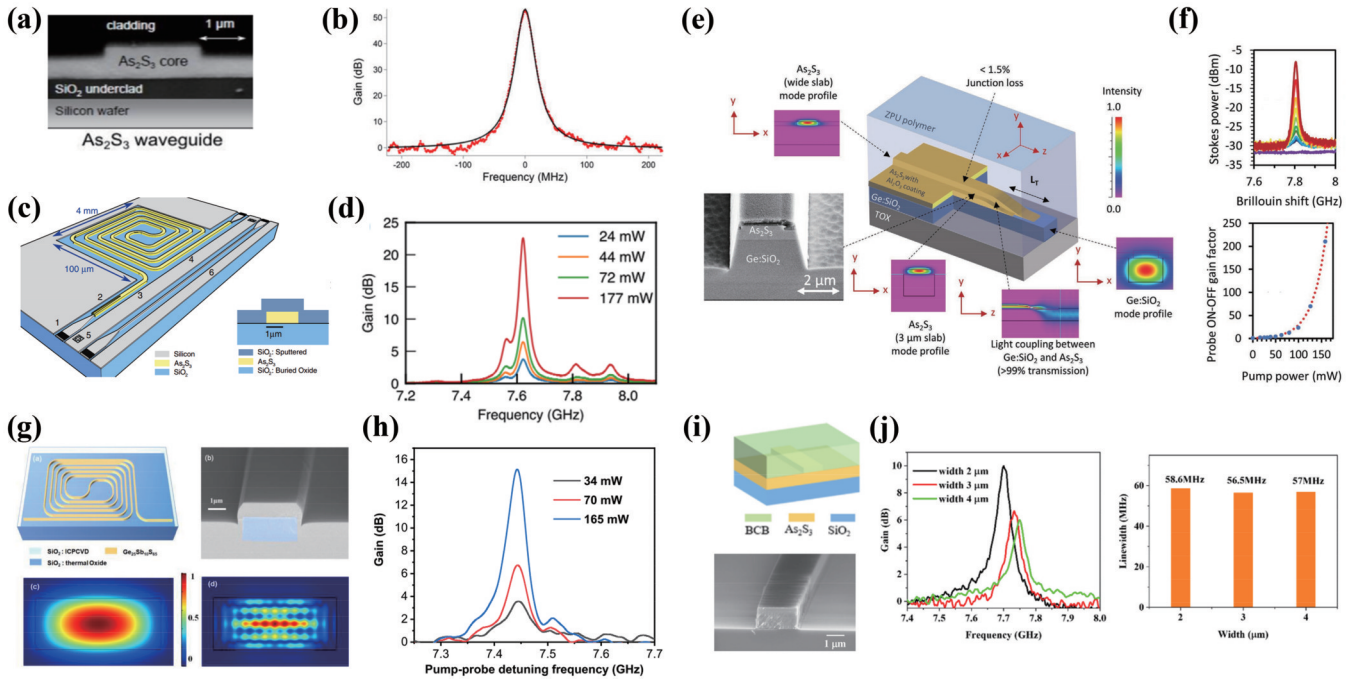


图 13 硫系集成波导在受激布里渊散射方面应用的结果。(a) As₂S₃脊形波导端面扫描电镜图;(b)在 As₂S₃波导中实现的 52 dB 布里渊开关增益谱^[164];(c)(d) As₂S₃-硅基混合集成波导及其增益谱^[165];(e)(f) As₂S₃-Ge: SiO₂混合集成波导及其增益谱^[167];(g)(h) Ge₂₅Sb₁₀S₆₅波导及其增益谱^[168];(i)(j)使用 BCB 包层的 As₂S₃波导及其增益谱^[169]

Fig. 13 Results of ChG integrated waveguides in SBS applications. (a) SEM of As₂S₃ rib waveguide; (b) 52 dB Brillouin on-off gain spectrum of As₂S₃ rib waveguide^[164]; (c) (d) As₂S₃-silicon hybrid integrated waveguide and its Brillouin gain spectrum^[165]; (e) (f) As₂S₃-Ge: SiO₂ hybrid integrated waveguides and its Brillouin gain spectrum^[167]; (g) (h) Ge₂₅Sb₁₀S₆₅ waveguides and its Brillouin gain spectrum^[168]; (i) (j) As₂S₃ waveguides with BCB cladding and its Brillouin gain spectrum^[169]

表 4 集成硫系波导的布里渊增益特性对比

Table 4 Comparison of Brillouin gain characteristics of integrated chalcogenide waveguides

Material	Length /cm	Loss / (dB·cm ⁻¹)	Brillouin frequency /GHz	Gain, G _B / (m ⁻¹ ·W ⁻¹)	Pump power / mW	On/off gain / dB
As ₂ S ₃ ^[163]	7	0.4	7.7	310.87	300	18.8
As ₂ S ₃ ^[170]	7	0.4	7.7	317.39	300	25.8
As ₂ S ₃ ^[164]	23	0.5	7.6	500	350	52
As ₂ S ₃ -Si ^[165]	5.8	0.7	7.6	750	180	22.5
As ₂ S ₃ -Ge: SiO ₂ ^[167]	23	0.5	7.8	419	158	~23
Ge ₂₅ Sb ₁₀ S ₆₅ ^[168]	7	0.2	7.443	338	200	17.6
^a As ₂ S ₃ -Si ^[166]	0.8	1	7.585	280	100	—
As ₂ S ₃ -BCB ^[169]	7.5	0.2	7.75	171	120	5.95

国内中山大学研究团队自 2018 年开始在基于硫系波导的集成光子器件中开展了一系列受激布里渊散射器件及其应用的研究。鉴于上述布里渊光子集成器件中常用的 As₂S₃ 光波导在实际应用中常会受到 As 的毒性和易被氧化等问题的影响,中山大学研究团队制备了基于新开发的无毒、性能稳定的 Ge₂₅Sb₁₀S₆₅ 的片上光波导,获得更高损伤阈值,该光波导可以适应较高

温度的氧化硅的沉积要求,与 CMOS 工艺的兼容性更好。2021 年,Song 等^[168]通过优化制备工艺,制备了长度为 7 cm、传输损耗约为 0.2 dB/cm 的硅基 GeSbS 光波导,当泵浦光为 200 mW 时,获得受激布里渊散射的开关增益为 17.6 dB[图 13(g),(h)]。同时,他们还对包层材料对声子的束缚能力进行了研究,这为提升硫系光子集成器件的受激布里渊增益和促进其在光通信

系统中的应用提供了实验依据和理论指导[图13(i)、(j)]^[169]。

由于受激布里渊散射的增益谱线宽很窄,基于光子集成器件的布里渊散射效应在过去十年中被广泛应用于全光信号处理和微波信号处理关键器件,如微波光子滤波器、低噪声微波源、高相干窄线宽激光器和光存储器等。图14展示了基于硫系片上布里渊散射的一些典型应用,可以看出,在这些应用中硫系集成光子器件在产生受激布里渊增益中的优势得到广泛应用。

1) 高频谱分辨率、高抑制比和带宽可调谐的微波光子滤波器^[171-174]。基于受激布里渊散射具有窄带高增益的特点,2012年,Byrnes等使用6.5 cm长的 As_2S_3 波导演示了基于受激布里渊效应的微波光子滤波器,实现了 (23 ± 2) MHz的3 dB带宽, (20 ± 2) dB的消光比,中心频率在2~12 GHz可调。为了使用较低的泵浦光功率实现超高消光比的陷波滤波器,Marpaung等利用布里渊散射和射频相消干涉的方法得到了消光比为60 dB、带宽为32~88 MHz、中心频率可调范围为1~40 GHz的陷波滤波器。2016年,Choudhary等通过优化硫系波导器件,实现了40 dB的布里渊开关增益,并且通过使用任意波形发生器对泵浦光进行调控,得到了带宽为30~440 MHz的可重构带通滤波器,中心频率可达30 GHz。

2) 低噪声微波源^[175]。低噪声的微波信号源是现代信息处理系统中的核心器件,而光电振荡环是产生高质量可调谐微波源的重要方式。目前基于传统微波电滤波器进行模式选择产生的光电振荡,其输出频率不可调并且受限于频率调谐范围。利用布里渊效应实现的微波光子带通滤波器可以很好地解决这一难题,具有宽带调谐特性,3 dB带宽也仅为10 MHz。2016年,Merklein等利用硫系波导的布里渊散射效应,实现了可调谐的低噪声微波源,其低频段的相位噪声性能远超当时商用的微波源。这验证了布里渊散射效应可以实现对光电振荡的宽带调谐,获得的微波信号具有覆盖几百 MHz到几十 GHz的频率范围、低相位噪声和高频谱纯度。

3) 微波测量^[176]。瞬时微波测量技术可以快速而准确地测量宽射频范围内多个未知的射频信号,可实现对环境和潜在威胁的感知,在现代国防等领域具有重要的应用价值。目前,虽然利用传统光子学技术可以有效扩展微波测量范围,但难以同时实现大测量带宽和高测量精度。2016年,Jiang等在硫系集成光波导上实现了窄线宽、高消光比的受激布里渊散射,得到了高斜率的功率-频率映射比,实现了覆盖9~38 GHz、测试精度小于1 MHz的高性能频率测量。

4) 窄线宽片上布里渊激光器^[66,165]。布里渊激光器具有窄线宽的优势,在线宽压缩、布里渊-克尔光频梳、光学陀螺仪等方面发挥着重要作用。基于硫系波导的集成微腔具有高布里渊增益、低损耗的特点,在实现窄线宽、低噪声的布里渊激光器应用中具有重要优势。

2017年,Morrison等在品质因子约为 4×10^5 的 $\text{Si-As}_2\text{S}_3$ 复合微环谐振腔中实现了国际上首个平面集成微环谐振腔的布里渊激光器,激光产生阈值仅为50 mW,验证了硫系集成器件产生受激布里渊激光器的可行性。研究者通过不断提升微腔的品质因子,进一步降低激光器产生的阈值。2020年,KAIST和澳大利亚国立大学合作通过类大马士革方法将 As_2S_3 微腔的品质因子提升到了约 1.44×10^7 ,测试得到的布里渊激光的激发阈值低至0.53 mW,斜率效率高达18%。但目前基于硫系光波导的集成布里渊激光器的线宽和噪声特性依旧没有得到系统表征。

5) 高分辨传感^[177]。受激布里渊散射的频移量对环境变化十分敏感,基于该频移量的传感是一种分布式的传感机制,可用于对空间分辨率需求为几米到几厘米的应用场景。布里渊光时间域分析中泵浦光脉冲的持续时间决定了布里渊响应的空间分辨率,在集成波导中实现分布式检测需要很高的空间分辨率。2018年,Zarifi等^[178]在硫系集成光波导中使用布里渊光相关域分析技术实现了亚毫米(800 μm)分辨率的分布式传感,验证了集成布里渊器件作为分布式传感器件反映波导的结构信息的可行性。

6) 光存储^[179]。光存储虽然已经在其他器件的应用中被报道,但是受光信号带宽的限制,光存储的实际应用一直没有实现。2017年,悉尼大学Merklein等在硫系材料集成波导中利用自由声子演示了通过受激布里渊散射将光学信息相干地传递到声学超声波完成光子的相干缓冲过程。反之,他们利用相反的过程提取光信息。他们不仅演示了具有GHz带宽光学信息的相位和幅度的存储,GHz带宽满足了光缓冲器实际应用的带宽要求,他们还在多个波长间利用声波和光波之间独特的相位匹配条件实现了信号无串扰的存储和传输。

3.2.3 受激拉曼散射效应

受激拉曼散射是介质中的一种非弹性光散射现象,基于受激拉曼散射效应产生的拉曼激光能够有效地拓展现有激光的输出波段。近年来,集成微腔平台中产生的拉曼激光可以大幅度减小器件尺寸和功耗,片上集成微腔中拉曼激光的产生和应用获得了广泛的研究^[53]。集成拉曼激光的性能与所用基质材料的拉曼增益系数和拉曼增益谱带宽紧密相关。硫系玻璃因具有大拉曼增益系数($\approx 10^{-12}$ m/W)、宽透光波段,在受激拉曼散射尤其是中红外受激拉曼散射的材料中具有显著优势。相较于拥有大拉曼增益系数的晶体材料,硫系材料的增益谱带宽大(>1 THz),可有效避免窄带拉曼增益谱导致的拉曼增益峰与微腔谐振峰错位的现象,提升拉曼激光的鲁棒性和转化效率。

Vanier等^[180-181]报道了超高品质因子的 As_2S_3 微球腔阈值低至亚毫瓦级别的拉曼激光。所用微球腔的耦合稳定性较差且其群速度色散特性较难调控,未能实现大范围可调谐的拉曼激光输出。2022年,Xia等制备了品质因子超过 2×10^6 的微环谐振腔,测得的拉曼

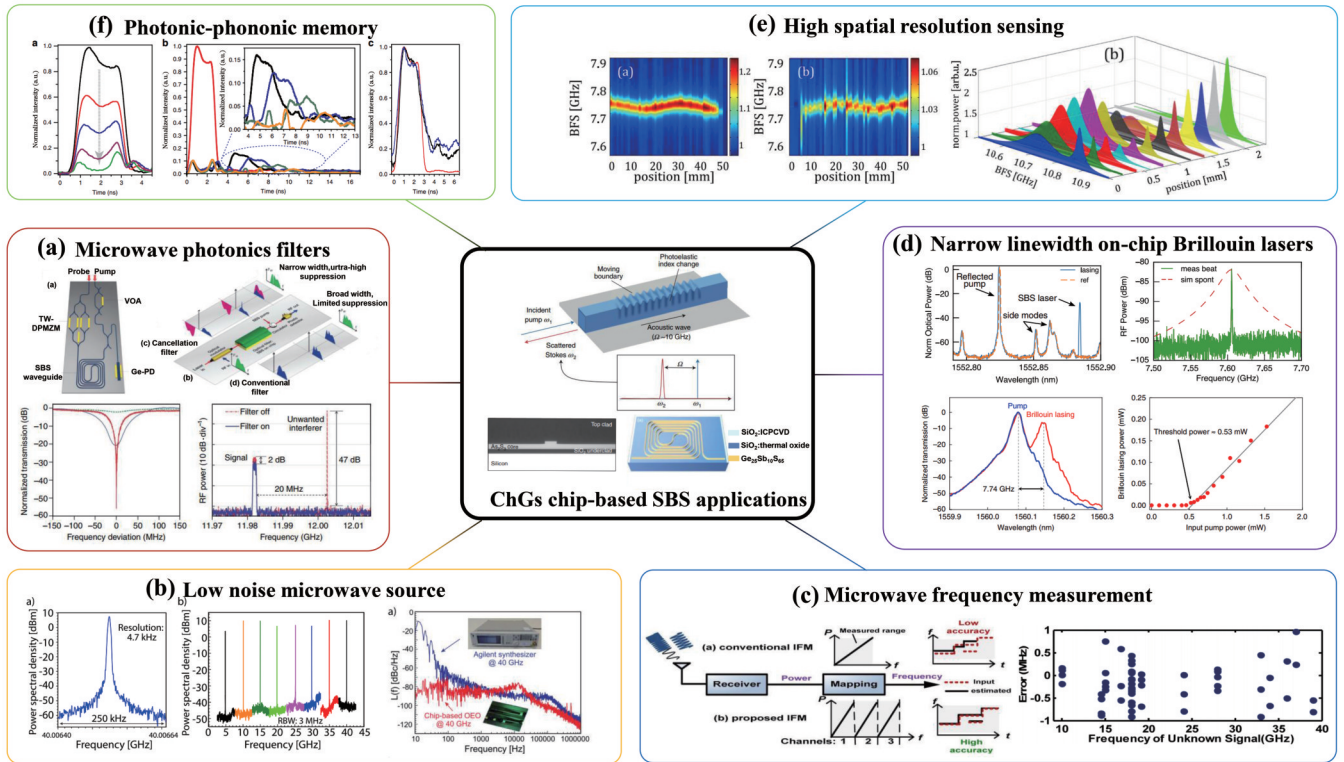


图 14 基于硫系片上布里渊散射的应用。(a)微波光子滤波器^[171-174];(b)低噪声微波源^[175];(c)微波测量^[176];(d)窄线宽片上布里渊激光^[66,165];(e)高分辨传感^[177];(f)光存储^[179]

Fig. 14 Applications of SBS in ChG integrated chips. (a) Microwave photonics filters^[171-174]; (b) low-noise microwave source^[175]; (c) microwave measurement^[176]; (d) narrow linewidth on-chip Brillouin laser^[66,165]; (e) high spatial resolution sensing^[177]; (f) photonic memory^[179]

激光阈值约为 3.25 mW,斜率效率约为 13.86%,如图 9(a)~(c)所示。他们在硫系集成微腔中实现了大范围可调谐的拉曼激光输出,图 15 展示了其代表性的结果^[53]。此外,他们通过调控微腔的群速度色散减小了一阶、二阶拉曼激光和泵浦光之间的相位失配量,得到了四波混频辅助下的级联拉曼激光输出。在调谐性方面,通过泵浦波长调谐和温度调谐,他们得到了可覆盖 1615~1755 nm 范围的任意波长拉曼激光输出,如图 15(d)~15(g)。该工作在拓展片上集成激光器的波段范围和调谐性方面具有重要价值,也为基于硫系集成微腔实现中红外波段的拉曼激光打下了基础。

除了硫系集成微腔中的拉曼激光器,利用硫系集成波导的高非线性、高拉曼增益和灵活色散调控的优势可以有效地扩展现有光纤锁模激光器的输出频谱范围,得到超快、宽带的锁模激光光源。2021年,Li等^[182]利用硫系集成光波导实现了外泵浦激发的超快拉曼锁模光孤子,图 16 展示了其代表性的结果。他们所制备的 GeSbSe 波导的折射率和非线性折射率分别为 2.8 和 $5.1 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$,且该波导在 1.55 μm 附近具有反常色散。通过使用锁模飞秒光纤激光器作为泵浦源并结合拉曼自频移技术,他们实现了可在 1589~1807 nm 波长范围内连续可调的拉曼孤子激光,所产生的超快拉曼孤子的脉冲宽度约为 185 fs,重复频率约为 14.3 MHz,泵浦脉冲的能量阈值低至 1.08 pJ,远

低于传统的光纤拉曼孤子的激发阈值,这充分体现了硫系集成光波导器件的低功耗优势。

4 总结与展望

最近几年,随着高性能硫系材料的开发和集成光子器件加工工艺的不断成熟,硫系光子集成器件在多种应用场景下展示出优异的器件特性,特别是在光子信号处理芯片方面得到了系统性的应用。因硫系玻璃材料具有覆盖可见光到红外波段的透明窗口、较高的折射率和非线性系数、较大的弹光系数、可沉积在晶体或非晶体基底上的特点,并且其光学性能可以通过材料的组分进行较大范围的调控,因此硫系集成光子器件在光纤通信、红外激光通信、红外分子探测等多个领域获得应用研究,并在工作带宽、功耗、多功能集成度等方面体现出显著优势,在多功能异质集成光子器件和系统领域具有重要的应用潜力。

结合光信息处理系统的发展需求和硫系集成光子器件的特点,硫系集成光子器件在集成光电子领域获得更大的发展,未来还需要在以下方面展开研究:

1) 硫系玻璃材料经过几十年的发展已经形成了完备的材料库,根据应用需求可以方便地选择合适的硫系玻璃组分,实现功能需求,如大非线性系数、大光声响应系数、正负热光系数等。但高品质硫系薄膜的制备工艺目前还主要依赖于真空热蒸镀工艺,硫系薄膜

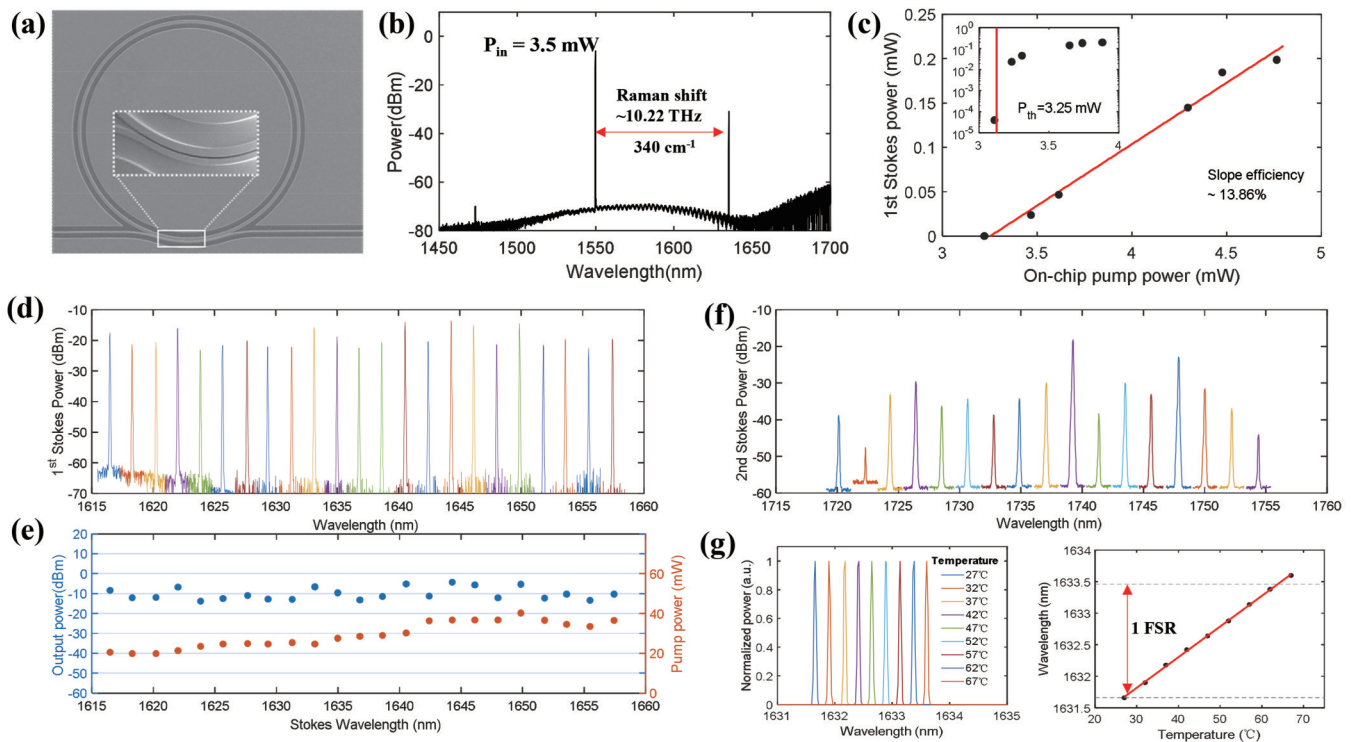


图 15 大带宽可调谐集成硫系拉曼激光器^[53]。(a)GeSbS 微环谐振腔的 SEM 照片；(b)拉曼激光光谱图；(c) 一阶拉曼光输出功率随泵浦功率的变化；(d)(e)一阶斯托克斯输出光谱和功率的离散调谐；(f)二阶斯托克斯输出光谱的离散调谐；(g)不同温度下拉曼激光的连续调谐

Fig. 15 Large bandwidth tunable ChG-based integrated Raman laser^[53]. (a) SEM of GeSbS microresonator; (b) Raman laser spectrum; (c) output power of the first-order Raman laser as a function of pump power; (d)(e) discrete tuning of the first Stokes output spectrum and discrete tuning of power; (f) discrete tuning of second-order Stokes output spectrum; (g) continuous tuning of Raman laser at different temperatures

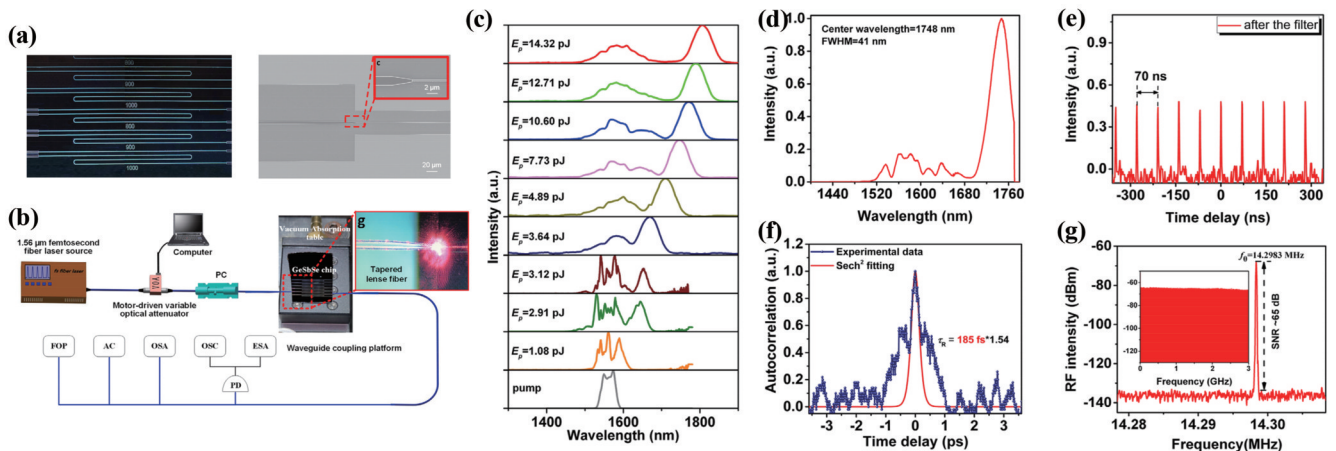


图 16 基于硫系波导的集成拉曼孤子激光器^[182]。(a)制备的宽度从 800 nm 至 1000 nm 范围内变化的 GeSbSe 波导的显微镜和 SEM 图；(b)实验装置示意图；(c)拉曼孤子的光谱特性；(d)脉冲能量为 7.73 pJ 下的拉曼孤子光谱；(e)拉曼孤子脉冲序列；(f)拉曼孤子单脉冲的自相关迹；(g)拉曼孤子的频域分析

Fig. 16 Integrated Raman soliton laser based on ChG waveguides^[182]. (a) Optical microscope image and SEM image of fabricated device with varying waveguide width between 800 and 1000 nm; (b) diagram of experimental setup; (c) measured optical spectra of Raman solitons; (d) Raman soliton spectrum under 7.73 pJ pulse energy; (e) Raman soliton pulse train; (f) autocorrelation trace of Raman soliton single pulse; (g) frequency domain analysis of Raman soliton

的组分准确性、批量化制备、与其他片上光子器件的混合集成工艺的兼容性等方面受到限制。未来,研究人

员还需要进一步筛选优化硫系材料的组分,开发 CMOS 兼容的薄膜沉积工艺,实现硫系薄膜的稳定批

量化的制备,这是硫系光子集成器件实现规模化应用的基础。

2)优化硫系光子集成器件的加工工艺,进一步降低的光学传输损耗(如 <0.1 dB/m量级)可以将多种非线性过程的激光泵浦功率降低至亚毫瓦量级,实现不需要外置光放大器辅助的全集成光子集成器件。同时,硫系光子集成器件在中红外波段具有显著的优势,但目前的硫系光子集成器件在中红外波段的应用研究也受光学损耗较大的限制,常需要体积大、昂贵的脉冲激光泵浦。更高品质因子的硫系光子集成器件可以利用片上连续激光器替代脉冲激光器,将有效拓展硫系光子集成器件在中红外波段的研究和实际应用。

3)硫系材料容易与其他材料平台实现混合异质集成,有利于开展片上半导体激光器、调制器和集成微梳的多个功能的模块式集成光电芯片的研制和应用研究。但目前硫系光子材料和器件的研究还处于实验室探索阶段。因此,需要打通硫系材料-器件-系统应用的全链条的研究路线,开展新型硫系光子集成芯片的兼容性制备和封装工艺开发,构建超高速、多维度、低功耗的光子集成器件,开展硫系集成光子器件在高精度分子探测芯片、高速光信号处理、大容量光存储、芯片级光计算等领域的应用研究。

参 考 文 献

- [1] 祝宁华,李明,郝跃.光电子器件与集成技术[J].中国科学:信息科学,2016,46(8):1156-1174.
Zhu N H, Li M, Hao Y. Optoelectronic devices and integration technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(8): 1156-1174.
- [2] 余思远.光子集成主要技术及主要挑战[J].光学与光电技术,2019,17(2):6-12.
Yu S Y. Main technologies and challenges in photonic integration[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 17(2): 6-12.
- [3] 储涛.硅基光电子集成器件[J].光学与光电技术,2019,17(4):5-9.
Chu T. Silicon-based optoelectronic integrated devices [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 17(4): 5-9.
- [4] Spencer D T, Drake T, Briles T C, et al. An optical-frequency synthesizer using integrated photonics[J]. Nature, 2018, 557(7703): 81-85.
- [5] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. Nature, 2018, 556(7701): 349-354.
- [6] Shen B Q, Chang L, Liu J Q, et al. Integrated turnkey soliton microcombs[J]. Nature, 2020, 582(7812): 365-369.
- [7] Riemensberger J, Lukashchuk A, Karpov M, et al. Massively parallel coherent laser ranging using a soliton microcomb[J]. Nature, 2020, 581(7807): 164-170.
- [8] Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core[J]. Nature, 2021, 589(7840): 52-58.
- [9] Balram K C, Davanço M I, Song J D, et al. Coherent coupling between radiofrequency, optical and acoustic waves in piezo-optomechanical circuits[J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 346-352.
- [10] 张新亮,赵延菁.微腔光频梳研究进展[J].光学学报,2021,41(8):0823014.
Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823014.
- [11] 王希,刘英杰,张子萌,等.2 μm 波段片上光子集成器件的研究进展(特邀)[J].红外与激光工程,2022,51(3):20220087.
Wang X, Liu Y J, Zhang Z M, et al. Research progress in 2 μm waveband on-chip photonic integrated devices (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20220087.
- [12] 乔玲玲,汪旻,伍荣波,等.超低损耗铌酸锂光子学[J].光学学报,2021,41(8):0823012.
Qiao L L, Wang M, Wu R B, et al. Ultra-low loss lithium niobate photonics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823012.
- [13] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J. Photonic-chip-based frequency combs[J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 158-169.
- [14] Xiang C, Liu J Q, Guo J, et al. Laser soliton microcombs heterogeneously integrated on silicon[J]. Science, 2021, 373(6550): 99-103.
- [15] Guidry M A, Lukin D M, Yang K Y, et al. Quantum optics of soliton microcombs[J]. Nature Photonics, 2022, 16(1): 52-58.
- [16] Liu X W, Gong Z, Bruch A W, et al. Aluminum nitride nanophotonics for beyond-octave soliton microcomb generation and self-referencing[J]. Nature Communications, 2021, 12: 5428.
- [17] Chang L, Xie W Q, Shu H W, et al. Ultra-efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator microresonators[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1331.
- [18] Zhang M, Buscaino B, Wang C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator[J]. Nature, 2019, 568(7752): 373-377.
- [19] Eggleton B J, Luther-Davies B, Richardson K. Chalcogenide photonics[J]. Nature Photonics, 2011, 5(3): 141-148.
- [20] Yamane M, Asahara Y. Glasses for photonics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [21] Asobe M, Kanamori T, Naganuma K, et al. Third-order nonlinear spectroscopy in As_2S_3 chalcogenide glass fibers [J]. Journal of Applied Physics, 1995, 77(11): 5518-5523.
- [22] Chen X, Xia L, Li W, et al. Simulation of Brillouin gain properties in a double-clad As_2S_3 chalcogenide photonic crystal fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(4): 042901.
- [23] Thielen P A, Shaw L B, Pureza P C, et al. Small-core As-Se fiber for Raman amplification[J]. Optics Letters,

- 2003, 28(16): 1406-1408.
- [24] Woods-Robinson R, Han Y B, Zhang H Y, et al. Wide band gap chalcogenide semiconductors[J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(9): 4007-4055.
- [25] Su Y K, Zhang Y. *Passive silicon photonics devices*[M]. New York: AIP Publishing, 2022.
- [26] Leidinger M, Fieberg S, Waasem N, et al. Comparative study on three highly sensitive absorption measurement techniques characterizing lithium niobate over its entire transparent spectral range[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21690-21705.
- [27] Su Y K, Zhang Y, Qiu C Y, et al. Silicon photonic platform for passive waveguide devices: materials, fabrication, and applications[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(8): 1901153.
- [28] Kischkat J, Peters S, Gruska B, et al. Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6789-6798.
- [29] Sanghera J S, Shaw L B, Busse L E, et al. Development and infrared applications of chalcogenide glass optical fibers[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2000, 19(3): 251-274.
- [30] Zhang B, Zeng P Y, Yang Z L, 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, et al. Dispersion engineered $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$ nanowires with a nonlinear parameter of $136 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ at 1550 nm[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 18866-18874.
- [32] Du Q Y, Luo Z Q, Zhong H K, 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.
- [33] Foster M A, Turner A C, Lipson M, et al. Nonlinear optics in photonic nanowires[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1300-1320.
- [34] Aitchison J S, Hutchings D C, Kang J U, et al. The nonlinear optical properties of AlGaAs at the half band gap[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(3): 341-348.
- [35] Ikeda K, Fainman Y. Material and structural criteria for ultra-fast Kerr nonlinear switching in optical resonant cavities[J]. *Solid-State Electronics*, 2007, 51(10): 1376-1380.
- [36] Dolgaleva K, Ng W C, Qian L, et al. Compact highly-nonlinear AlGaAs waveguides for efficient wavelength conversion[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12440-12455.
- [37] He Y, Yang Q F, Ling J W, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO_3 soliton microcomb[J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1138-1144.
- [38] Wang C L, Fang Z W, Yi A L, et al. High-Q microresonators on 4H-silicon-carbide-on-insulator platform for nonlinear photonics[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 139.
- [39] Puckett M W, Liu K K, Chauhan N, et al. 422 Million intrinsic quality factor planar integrated all-waveguide resonator with sub-MHz linewidth[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 934.
- [40] Ji X C, Barbosa F A S, Roberts S P, et al. Ultra-low-loss on-chip resonators with sub-milliwatt parametric oscillation threshold[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 619-624.
- [41] Liu X W, Sun C Z, Xiong B, et al. Integrated high-Q crystalline AlN microresonators for broadband Kerr and Raman frequency combs[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1943-1950.
- [42] Zheng Y Z, Sun C Z, Xiong B, et al. Integrated gallium nitride nonlinear photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(1): 2100071.
- [43] Wilson D J, Schneider K, Hönl S, et al. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(1): 57-62.
- [44] Chen Y, Shen X, Wang R P, et al. Optical and structural properties of Ge-Sb-Se thin films fabricated by sputtering and thermal evaporation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 548: 155-160.
- [45] Ramachandran S, Bishop S G. Photoinduced integrated-optic devices in rapid thermally annealed chalcogenide glasses[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(1): 260-270.
- [46] Saito Y, Fons P, Bolotov L, et al. A two-step process for growth of highly oriented Sb_2Te_3 using sputtering[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(4): 045220.
- [47] Nazabal V, Jurdyk A M, Němec P, et al. Amorphous Tm^{3+} doped sulfide thin films fabricated by sputtering[J]. *Optical Materials*, 2010, 33(2): 220-226.
- [48] Nazabal V, Charpentier F, Adam J L, et al. Sputtering and pulsed laser deposition for near- and mid-infrared applications: a comparative study of $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ and $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{65}$ amorphous thin films[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(5): 990-1000.
- [49] Olivier M, Němec P, Boudebs G, et al. Photosensitivity of pulsed laser deposited Ge-Sb-Se thin films[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(4): 781-793.
- [50] Chern G C, Lauks I, Norian K H. Spin-coated amorphous chalcogenide films: photoinduced effects[J]. *Thin Solid Films*, 1985, 123(4): 289-296.
- [51] Kohoutek T, Wagner T, Orava J, et al. Amorphous films of Ag-As-S system prepared by spin-coating technique, preparation techniques and films physico-chemical properties[J]. *Vacuum*, 2004, 76(2/3): 191-194.
- [52] Gai X, Han T, Prasad A, et al. Progress in optical waveguides fabricated from chalcogenide glasses[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26635-26646.
- [53] Xia D, Huang Y F, Zhang B, et al. Engineered Raman lasing in photonic integrated chalcogenide microresonators [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(4): 2100443.
- [54] Mochalov L, Logunov A, Markin A, et al. Characteristics of the Te-based chalcogenide films dependently on the parameters of the PECVD process[J].

- Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(4): 197.
- [55] Mochalov L, Nezhdanov A, Kudryashov M, et al. Influence of plasma-enhanced chemical vapor deposition parameters on characteristics of As-Te chalcogenide films [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2017, 37(5): 1417-1429.
- [56] Mochalov L, Kudryashov M, Logunov A, et al. Structural and optical properties of arsenic sulfide films synthesized by a novel PECVD-based approach[J]. Superlattices and Microstructures, 2017, 111: 1104-1112.
- [57] Wang C, Wang Y H, Xiong Z Z, et al. The optical properties of GeSe₂ nano-films prepared by CVD[J]. Optical Materials, 2020, 100: 109697.
- [58] Geiger S, Du Q Y, Huang B, et al. Understanding aging in chalcogenide glass thin films using precision resonant cavity refractometry[J]. Optical Materials Express, 2019, 9(5): 2252-2263.
- [59] Özhan A E S, Hacaloğlu T, Kaftanoğlu B. Development of hard, anti-reflective coating for mid wave infrared region[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 119: 103910.
- [60] Whitham P J, Strommen D P, Lau L D, et al. Thin film growth of germanium selenides from PECVD of GeCl₄ and dimethyl selenide[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2011, 31(2): 251-256.
- [61] Nezhdanov A, Usanov D, Kudryashov M, et al. Impact of composition and *ex-situ* laser irradiation on the structure and optical properties of As-S-based films synthesized by PECVD[J]. Optical Materials, 2019, 96: 109292.
- [62] Mochalov L, Dorosz D, Nezhdanov A, et al. Investigation of the composition-structure-property relationship of As_xTe_{100-x} films prepared by plasma deposition[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 191: 211-216.
- [63] Mochalov L, Logunov A, Vorotyntsev V. Structural and optical properties of As-Se-Te chalcogenide films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition [J]. Materials Research Express, 2019, 6(5): 056407.
- [64] Saito Y, Morota M, Makino K, et al. Recent developments concerning the sputter growth of chalcogenide-based layered phase-change materials[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 135: 106079.
- [65] Bulai G, Pompilian O, Gurlui S, et al. Ge-Sb-Te chalcogenide thin films deposited by nanosecond, picosecond, and femtosecond laser ablation[J]. Nanomaterials, 2019, 9(5): 676.
- [66] 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: 5933.
- [67] Xia D, Yang Z L, Zeng P Y, et al. Soliton microcombs in integrated chalcogenide microresonators[EB/OL]. (2022-02-12) [2022-03-04]. <https://arxiv.org/abs/2202.05992>.
- [68] Mochalov L, Dorosz D, Kudryashov M, et al. Infrared and Raman spectroscopy study of As-S chalcogenide films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2018, 193: 258-263.
- [69] Balan V, Vigreux C, Pradel A. Chalcogenide thin films deposited by radio-frequency sputtering[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2004, 6(3): 875-882.
- [70] Kohoutek T, Wagner T, Frumar M, et al. Effect of cluster size of chalcogenide glass nanocolloidal solutions on the surface morphology of spin-coated amorphous films [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 063511.
- [71] Hô N, Phillips M C, Qiao H, et al. Single-mode low-loss chalcogenide glass waveguides for the mid-infrared [J]. Optics Letters, 2006, 31(12): 1860-1862.
- [72] Fick J, Nicolas B, Rivero C, et al. Thermally activated silver diffusion in chalcogenide thin films[J]. Thin Solid Films, 2002, 418(2): 215-221.
- [73] Bryce R M, Nguyen H T, Nakeeran P, et al. Direct UV patterning of waveguide devices in As₂Se₃ thin films[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2004, 22(3): 1044-1047.
- [74] Huang C C, Hewak D W. Silver-doped germanium sulphide glass channel waveguides fabricated by chemical vapour deposition and photo-dissolution process[J]. Thin Solid Films, 2006, 500(1/2): 247-251.
- [75] 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.
- [76] Han T, Madden S, Debbarma S, et al. Improved method for hot embossing As₂S₃ waveguides employing a thermally stable chalcogenide coating[J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25447-25453.
- [77] 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.
- [78] Zou Y, Lin H T, Li L, et al. Thermal nanoimprint fabrication of chalcogenide glass waveguide resonators on nonconventional plastic substrates[C]//2013 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 8-10, 2013, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2013: 66-67.
- [79] 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): 1184-1191.
- [80] Hu J J, Tarasov V, Carlie N, et al. Si-CMOS-compatible lift-off fabrication of low-loss planar chalcogenide waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(19): 11798-11807.
- [81] Hu J J, Carlie N, Petit L, et al. Cavity-enhanced IR absorption in planar chalcogenide glass microdisk resonators: experiment and analysis[J]. Journal of

- Lightwave Technology, 2009, 27(23): 5240-5245.
- [82] Hu J 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.
- [83] Lin H T, 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.
- [84] Choi D Y, Madden S, Rode A, et al. Dry etching characteristics of amorphous As_2S_3 film in CHF_3 plasma [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104: 113305.
- [85] Chen J Y, Zhou Q, Wang Y, et al. Characterization of optical waveguide in chalcogenide glass formed by helium ion implantation[J]. Indian Journal of Physics, 2021, 95 (6): 1239-1243.
- [86] Ponnampalam N, Decorby R, Nguyen H, et al. Small core rib waveguides with embedded gratings in As_2Se_3 glass[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6270-6277.
- [87] Zhai Y F, Qi R D, Yuan C Z, et al. High-quality chalcogenide glass waveguide fabrication by hot melt smoothing and micro-trench filling[J]. Applied Physics Express, 2016, 9(5): 052201.
- [88] 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.
- [89] Hu J J, Tarasov V, Agarwal A, et al. Fabrication and testing of planar chalcogenide waveguide integrated microfluidic sensor[J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2307-2314.
- [90] 菅佳玲, 叶羽婷, 李钧颖, 等. 基于硫系玻璃的微纳光子器件研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(12): 2676-2690.
- Jian J L, Ye Y T, Li J Y, et al. Recent progress of micro/nano photonic devices based on chalcogenide glasses[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(12): 2676-2690.
- [91] Hu J 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.
- [92] 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.
- [93] Du Q Y, Huang Y Z, Li J Y, et al. Low-loss photonic device in Ge-Sb-S chalcogenide glass[J]. Optics Letters, 2016, 41(13): 3090-3093.
- [94] Ruan Y L, Li W T, Jarvis R, et al. Fabrication and characterization of low loss rib chalcogenide waveguides made by dry etching[J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5140-5145.
- [95] Madden S J, Choi D Y, Bulla D A, et al. Long, low loss etched As_2S_3 chalcogenide waveguides for all-optical signal regeneration[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14414-14421.
- [96] Serna S, Lin H T, Alonso-Ramos C, et al. Nonlinear optical properties of integrated GeSbS chalcogenide waveguides[J]. Photonics Research, 2018, 6(5): 69-74.
- [97] Zhu Y, Wan L, Chen Z S, et al. Effects of shallow suspension in low-loss waveguide-integrated chalcogenide microdisk resonators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(17): 4817-4823.
- [98] Zhang R Z, Yang Z, Zhao M Y, et al. High quality, high index-contrast chalcogenide microdisk resonators[J]. Optics Express, 2021, 29(12): 17775-17783.
- [99] Yang Z, Zhang R Z, Wang Z Y, et al. High-Q, submicron-confined chalcogenide microring resonators[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 33225-33233.
- [100] Jean P, Douaud A, LaRochelle S, et al. Hybrid integration of high-Q chalcogenide microring resonators on silicon-on-insulator[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC, USA. Washington, DC: OSA, 2020: STh3O.3.
- [101] Yu Y, Gai X, Ma P, et al. Experimental demonstration of linearly polarized 2-10 μm supercontinuum generation in a chalcogenide rib waveguide[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 958-961.
- [102] Lin H T, Xiang Y, Li L, et al. High-Q mid-infrared chalcogenide glass resonators for chemical sensing[C]//2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 14-16, 2014, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2014: 61-62.
- [103] Ma P, Choi D Y, Yu Y, et al. Low-loss chalcogenide waveguides for biosensing in the mid-infrared[C]//2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 14-16, 2014, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2014: 59-60.
- [104] Shen W H, Zeng P Y, Yang Z L, et al. Chalcogenide glass photonic integration for improved 2 μm optical interconnection[J]. Photonics Research, 2020, 8(9): 1484-1490.
- [105] Jin T N, Zhou J C, Lin H Y G, et al. Mid-infrared chalcogenide waveguides for real-time and nondestructive volatile organic compound detection[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(1): 817-822.
- [106] Li L, Lin H T, Qiao S T, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices[J]. Nature Photonics, 2014, 8(8): 643-649.
- [107] Zhou J, Du Q Y, Xu P P, et al. Large nonlinearity and low loss Ge-Sb-Se glass photonic devices in near-infrared [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(4): 6101306.
- [108] Du Q Y, Wang C T, Zhang Y F, et al. Monolithic on-chip magneto-optical isolator with 3 dB insertion loss and 40 dB isolation ratio[J]. ACS Photonics, 2018, 5(12): 5010-5016.
- [109] Zhou C F, Zhang X L, Luo Y, et al. Narrow-bandwidth Bragg grating filter based on Ge-Sb-Se chalcogenide glasses[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12228-12236.
- [110] 杨振, 王栎泮, 靳慧敏, 等. 硫系玻璃集成光子器件综述(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20220152.
- Yang Z, Wang Y F, Jin H M, et al. Review of chalcogenide glass integrated photonic devices(Invited)

- [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20220152.
- [111] 夏利鹏, 刘昱恒, 周培基, 等. 中红外集成光子传感系统研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(3): 20220104.
- Xia L P, Liu Y H, Zhou P J, et al. Advances in mid-infrared integrated photonic sensing system(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20220104.
- [112] 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.
- [113] 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.
- [114] 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.
- [115] Lin H T, Song Y, Huang Y Z, et al. Chalcogenide glass-on-graphene photonics[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(12): 798-805.
- [116] Singh R, Su P, Kimerling L, et al. Towards on-chip mid infrared photonic aerosol spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(23): 231107.
- [117] 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.
- [118] 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.
- [119] Zheng J J, Khanolkar A, Xu P 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.
- [120] de Leonadis F, Soref R, Passaro V M N, et al. Broadband electro-optical crossbar switches using low-loss $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_6\text{Te}_1$ phase change material[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3183-3191.
- [121] Xu P P, Zheng J J, Doylend J K, et al. Low-loss and broadband nonvolatile phase-change directional coupler switches[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 553-557.
- [122] Zhang Q H, Zhang Y F, Li J Y, 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.
- [123] Zhang Y F, Chou J B, Li J Y, et al. Broadband transparent optical phase change materials for high-performance nonvolatile photonics[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4279.
- [124] Zhang Y F, Fowler C, Liang J H, et al. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(6): 661-666.
- [125] Zhu D F, Wang X Y, Li J, et al. Design of nonvolatile and efficient polarization-rotating optical switch with phase change material[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 151(1): 108065.
- [126] Pernice W H P, Bhaskaran H. Photonic non-volatile memories using phase change materials[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(17): 171101.
- [127] Rios C, Stegmaier M, Hosseini P, et al. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 725-732.
- [128] Rios C, Youngblood N, Cheng Z G, et al. In-memory computing on a photonic platform[J]. *Science Advances*, 2019, 5(2): eaau5759.
- [129] Zhang B, Sun Y D, 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.
- [130] Knotek P, Tichy L, Arsova D, et al. Irreversible photobleaching, photorefractive and photoexpansion in GeS_2 amorphous film[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 119(1/2): 315-318.
- [131] Kawaguchi T, Maruno S, Masui K J. Photobleaching and thermal-bleaching effects in amorphous Ge-S films [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1987, 97/98: 1219-1222.
- [132] Zoubir A, Richardson M, Rivero C, et al. Direct femtosecond laser writing of waveguides in As_2S_3 thin films[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(7): 748-750.
- [133] Levy S, Klebanov M, Zadok A. High-Q ring resonators directly written in As_2S_3 chalcogenide glass films[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(3): 63-67.
- [134] Baker N J, Lee H W, Littler I C, et al. Sampled Bragg gratings in chalcogenide (As_2S_3) rib-waveguides[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9451-9459.
- [135] Hu J J, Torregiani M, Morichetti F, et al. Resonant cavity-enhanced photosensitivity in As_2S_3 chalcogenide glass at 1550 nm telecommunication wavelength[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(6): 874-876.
- [136] Shen B, Lin H T, Azadeh S S, et al. Reconfigurable frequency-selective resonance splitting in chalcogenide microring resonators[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(2): 499-511.
- [137] Zhu J G, Horning T M, Zohrabi M, et al. Photo-induced writing and erasing of gratings in As_2S_3 chalcogenide microresonators[J]. *Optica*, 2020, 7(11): 1645-1648.
- [138] Youden K E, Grevatt T, Eason R W, et al. Pulsed laser deposition of Ga-La-S chalcogenide glass thin film optical waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(12): 1601-1603.
- [139] Rao A, Patil A, Chiles J, et al. Heterogeneous microring and Mach-Zehnder modulators based on lithium niobate and chalcogenide glasses on silicon[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22746-22752.
- [140] Xia X, Chen Q, Tsay C, et al. Low-loss chalcogenide waveguides on lithium niobate for the mid-infrared[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3228-3230.
- [141] Macik D D, Madsen C K. Fabrication of LiNbO_3 - As_2S_3

- waveguides for beam steering applications[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9970: 99700H.
- [142] Zhang C, Madsen C K. Demonstration of an As_2S_3 grating coupler on thin film LiNbO_3 [J]. Optics and Photonics Journal, 2018, 8(4): 111-121.
- [143] Khan M S I, Mahmoud A, Cai L T, et al. Extraction of elastooptic coefficient of thin-film arsenic trisulfide using a Mach-Zehnder acoustooptic modulator on lithium niobate[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7): 2053-2059.
- [144] Wan L, Yang Z Q, Zhou W F, et al. Highly efficient acousto-optic modulation using nonsuspended thin-film lithium niobate-chalcogenide hybrid waveguides[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 145.
- [145] Pi M Q, Zheng C T, 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.
- [146] Ríos C, Zhang Y F, Shalaginov M Y, et al. Multi-level electro-thermal switching of optical phase-change materials using graphene[J]. Advanced Photonics Research, 2021, 2(1): 2000034.
- [147] Deckoff-Jones S, Lin H T, Kita D, et al. Chalcogenide glass waveguide-integrated black phosphorus mid-infrared photodetectors[J]. Journal of Optics, 2018, 20(4): 044004.
- [148] Deckoff-Jones S, Wang Y X, Lin H T, et al. Tellurene: a multifunctional material for midinfrared optoelectronics [J]. ACS Photonics, 2019, 6(7): 1632-1638.
- [149] Eggleton B J, Vo T D, Pant R, et al. Photonic chip based ultrafast optical processing based on high nonlinearity dispersion engineered chalcogenide waveguides[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(1): 97-114.
- [150] Lamont M R, Luther-Davies B, Choi D Y, et al. Supercontinuum generation in dispersion engineered highly nonlinear ($\gamma = 10/\text{W}/\text{m}$) As_2S_3 chalcogenide planar waveguide[J]. Optics Express, 2008, 16(19): 14938-14944.
- [151] Ta'eed V G, Shokooh-Saremi M, Fu L B, et al. Integrated all-optical pulse regenerator in chalcogenide waveguides[J]. Optics Letters, 2005, 30(21): 2900-2902.
- [152] Ta'eed V, Pelusi M D, Eggleton B J, et al. Broadband wavelength conversion at 40 Gb/s using long serpentine As_2S_3 planar waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15047-15052.
- [153] Lamont M R, de Sterke C M, Eggleton B J. Dispersion engineering of highly nonlinear As_2S_3 waveguides for parametric gain and wavelength conversion[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9458-9463.
- [154] Vo T D, Hu H, Galili M, et al. Photonic chip based transmitter optimization and receiver demultiplexing of a 1.28 Tbit/s OTDM signal[J]. Optics Express, 2010, 18(16): 17252-17261.
- [155] Zeng P Y, Xia D, Yang Z L, et al. High-Q Ge-As-S microring resonators based on improved fabrication process for optical parametric amplifier[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [156] Shang H Y, Sun D D, Zhang M J, et al. On-chip detector based on supercontinuum generation in chalcogenide waveguide[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(12): 3890-3895.
- [157] Xia D, Huang Y F, Zhang B, et al. On-chip broadband mid-infrared supercontinuum generation based on highly nonlinear chalcogenide glass waveguides[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 598091.
- [158] Jiang W C, Li K M, Gai X, et al. Ultra-low-power four-wave mixing wavelength conversion in high-Q chalcogenide microring resonators[J]. Optics Letters, 2021, 46(12): 2912-2915.
- [159] Chang L, Liu S T, Bowers J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. Nature Photonics, 2022, 16(2): 95-108.
- [160] Kippenberg T J, Gaeta A L, Lipson M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators[J]. Science, 2018, 361(6402): eaan8083.
- [161] Xia D, Zeng P Y, Yang Z L, et al. Kerr frequency comb generation in photonic integrated Ge-As-S chalcogenide microresonators[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, DC: OSA, 2020: SW4J.2.
- [162] Xia D, Yang Z L, Zeng P Y, et al. Integrated Ge-Sb-S chalcogenide microresonator on chip for nonlinear photonics[C]//14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020), August 2-6, 2020, Sydney, NSW, Australia. Washington, DC: OSA, 2020: C3C_1.
- [163] Pant R, Poulton C G, Choi D Y, et al. On-chip stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8285-8290.
- [164] Choudhary A, Morrison B, Aryanfar I, et al. Advanced integrated microwave signal processing with giant on-chip Brillouin gain[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 846-854.
- [165] Morrison B, Casas-Bedoya A, Ren G H, et al. Compact Brillouin devices through hybrid integration on silicon[J]. Optica, 2017, 4(8): 847-854.
- [166] Liu Y, Choudhary A, Ren G H, et al. Circulator-free Brillouin photonic planar circuit[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(5): 2000481.
- [167] Lai C K, Choi D Y, Athanasios N J, et al. Hybrid chalcogenide-germanosilicate waveguides for high performance stimulated Brillouin scattering applications [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(3): 2105230.
- [168] Song J C, Guo X J, Peng W T, 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.
- [169] Song J C, Feng T H, Wei Y H, et al. On-chip stimulated Brillouin scattering in As_2S_3 waveguides with soft claddings of Benzocyclobutene[J]. Optics

- Communications, 2022, 509: 127879.
- [170] Pant R, Byrnes A, Poulton C G, et al. Photonic chip based tunable slow and fast light via stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2012, 37(5): 969-971.
- [171] Byrnes A, Pant R, Li E B, et al. Photonic chip based tunable and reconfigurable narrowband microwave photonic filter using stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Express, 2012, 20(17): 18836-18845.
- [172] Marpaung D, Pagani M, Morrison B, et al. Nonlinear integrated microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(20): 3421-3427.
- [173] 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.
- [174] Choudhary A, Aryanfar I, Shahnia S, et al. Tailoring of the Brillouin gain for on-chip widely tunable and reconfigurable broadband microwave photonic filters[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 436-439.
- [175] Merklein M, Stiller B, Kabakova I V, et al. Widely tunable, low phase noise microwave source based on a photonic chip[J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4633-4636.
- [176] Jiang H Y, Marpaung D, Pagani M, et al. Wide-range, high-precision multiple microwave frequency measurement using a chip-based photonic Brillouin filter[J]. Optica, 2016, 3(1): 30-34.
- [177] Zarifi A, Stiller B, Merklein M, et al. Highly localized distributed Brillouin scattering response in a photonic integrated circuit[J]. APL Photonics, 2018, 3(3): 036101.
- [178] Zarifi A, Stiller B, Merklein M, et al. Brillouin spectroscopy of a hybrid silicon-chalcogenide waveguide with geometrical variations[J]. Optics Letters, 2018, 43(15): 3493-3496.
- [179] Merklein M, Stiller B, Vu K, et al. A chip-integrated coherent photonic-phononic memory[J]. Nature Communications, 2017, 8: 574.
- [180] 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.
- [181] 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.
- [182] Li Z, Du Q Y, Wang C P, et al. Externally pumped photonic chip-based ultrafast Raman soliton source[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(2): 2000301.