

## 中红外锗基集成光电子研究进展

郭荣翔<sup>1,2</sup>, 高浩然<sup>1,2</sup>, 程振洲<sup>1,2\*</sup>, 刘铁根<sup>1,2</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;<sup>2</sup>光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要** 中红外(波长为 2~20  $\mu\text{m}$ )集成光学在光谱分析、环境监测、医疗诊断、通信测距等领域具有广泛的应用前景。在现有的中红外集成光电子材料中,“IV 族”半导体材料(如硅、锗、锡、石墨烯等)具有超宽的光谱带宽、出色的光电特性、良好的物理化学稳定性、器件制作与互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术兼容等优势,得到了广泛的关注。回顾了基于“IV 族”材料的中红外集成光电子的发展历程,重点针对近年来新兴的中红外锗基集成光电子的器件和应用进行了综述,对中红外集成光电子的发展前景进行了展望和讨论。希望能够为中红外光学、硅基光子学、锗基光子学、光电材料、光学传感和光谱等领域的研究工作者提供有用的参考资料。

**关键词** 集成光学; 集成光学器件; 红外光子学; 非线性光学; 中红外集成光电子; 锗基

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1901002

## 1 引言

在中红外波段(波长为 2~20  $\mu\text{m}$ ),光子能量对应分子振动能级的基频跃迁,并涵盖三个大气窗口(波长为 2~2.5  $\mu\text{m}$ , 3~5  $\mu\text{m}$ , 8~13  $\mu\text{m}$ )<sup>[1]</sup>,在传感、测距、通信和非线性等研究领域引起了非常广泛的关注<sup>[2-7]</sup>。另一方面,自从 1969 年贝尔实验室的 Miller<sup>[8]</sup>首次提出集成光学的概念以来,集成光学已经经历了 50 年的发展,不仅在成本、能耗、尺寸等方面为空间光学的应用带来极大突破,而且有望在微纳米尺度上发现新的物理现象和机理,产生颠覆性创新。可以预计,中红外光学与集成光的结合将为医疗诊断、环境监测、工业安全、人工智能、航空航天、自动驾驶等众多领域带来革命性的应用,如图 1 所示。目前,中红外集成光学器件主要包括贵金属表面等离子激元器件、硫系玻璃器件和“IV 族”半导体(如硅,锗,锡,石墨烯等)器件等三类。其中,贵金属表面等离子激元器件可以实现纳米级的光电集成,但器件的光学损耗往往较高,不利于大规模片上系统集成<sup>[9-10]</sup>;硫系玻璃器件可以实现超宽光谱范围和超低光学损耗的波导器件,但其加工制作与互补

金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺的兼容性较差<sup>[11-12]</sup>;“IV 族”半导体器件具有超宽的光谱带宽、良好的物理化学稳定性、器件制作与 CMOS 工艺完全兼容的优势,可实现高质量、大面积、低成本光电器件集成<sup>[13-14]</sup>,并且有与通信、计算、存储等电子器件实现单片集成的发展潜力。一般来讲,“IV 族”半导体器件的波导光学损耗可达到 1 dB/cm 以下<sup>[15]</sup>,介于贵金属表面等离子激元器件和硫系玻璃器件之间,满足片上系统集成的要求。随着微纳加工技术的日益成熟和硅基光子学产业的飞速发展,基于“IV 族”材料的中红外集成光电子逐渐获得越来越多的关注<sup>[16-19]</sup>。

“IV 族”材料不但与 CMOS 技术兼容,而且具备出色的光学和光电特性,特别适于开发中红外集成光电子器件。首先,硅基和锗基材料具有超大折射率和超宽中红外光学透明窗口。硅基材料的折射率可达 3.4,透明窗口覆盖 1.1~8.0  $\mu\text{m}$  波段<sup>[20]</sup>。与锗锡材料结合后,合金材料的光学透明窗口可以进一步向长波段拓展<sup>[21]</sup>。单晶锗基材料的折射率可达 4.0,其透明窗口可覆盖至 2.0~14.0  $\mu\text{m}$ ,

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-19; 录用日期: 2021-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(62175179, 61805175)

通信作者: \*zhenzhoucheng@tju.edu.cn

几乎完全覆盖中红外“官能团区”和“分子指纹区”<sup>[22]</sup>,是一种开发中红外集成光路的理想材料。其次,石墨烯在超宽光谱范围内具有光电响应,并且其电子态密度低,利用外加电场可调控石墨烯的费米能级,非常适合开发中红外电光调制和光电探测器件<sup>[23-30]</sup>。相比现有的中红外光电探测材料如碲镉汞材料<sup>[31]</sup>、量子阱材料<sup>[32]</sup>和 II 类超晶格材料<sup>[33]</sup>等,石墨烯的制备对环境污染小,可以与波导器件结合开发异质集成器件<sup>[34]</sup>,并且不存在晶格失配的问题。此外,还可以通过波导器件调控石墨烯的光学吸收作用<sup>[35-37]</sup>,具有极大的发展潜力。最后,硅基、锗基和石墨烯材料均是出色的非线性光学材料。硅基材料的非线性折射率达到  $10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}^{[20]}$ ,比二氧化硅高两个数量级,而锗基材料和石墨烯的非线性折射率更是分别达到了  $10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}^{[38]}$  和  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{W}^{[39]}$ ,有望用于开发具有超宽光谱范围的非线性相干光源,以克服现有中红外激光器如量子级联激光器<sup>[40]</sup>、铅盐激光器<sup>[41]</sup>、稀土掺杂波导激光器<sup>[42]</sup>等在光谱带宽和激光线宽等方面的局限性。因此,作为基于 CMOS 技术开发的中红外集成光路,中红外硅基光子学和锗基光子学均已发展成为热门的研究课题。

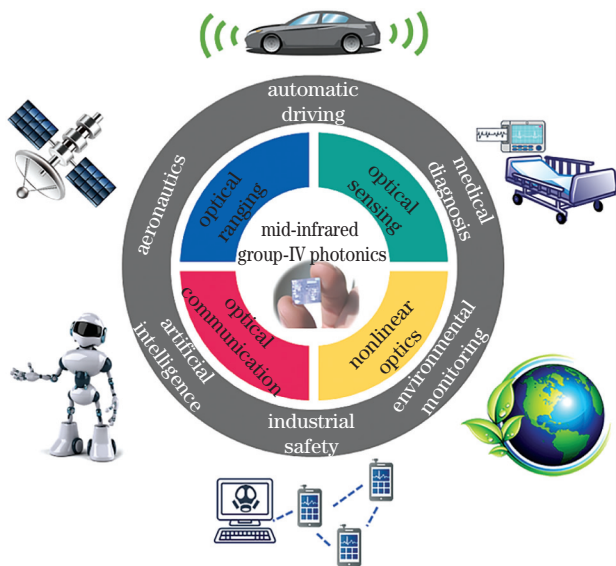


图 1 基于“IV 族”材料的中红外集成光电子及其应用

Fig. 1 Mid-infrared group-IV photonics and its applications

本文简要回顾了基于“IV 族”材料的中红外集成光电子的发展历程,重点总结了中红外锗基光子学的前沿进展,并对中红外集成光电子的前景进行了展望和讨论。本文的具体结构安排为:在第二节中,对比讨论了基于 CMOS 工艺的中红外集成光电子的晶圆类型,探讨了不同类型锗基晶圆的特点;在

第三节和第四节中,详细总结了现有的中红外锗基波导无源器件和光电器件的研究现状;在第五节和第六节中,从生物化学传感和非线性光学两方面综述了目前已开展的中红外锗基波导器件的应用;在第七节中,总结了本文的综述内容,对中红外集成光电子的发展机遇进行了展望。

## 2 锗基晶圆及波导类型

在通信波段集成光电子的研究和应用中,硅-绝缘体(silicon-on-insulator, SOI)晶圆是最常用的晶圆。但由于其氧化埋层(buried oxide, BOX)对中红外光的强烈吸收,工作在通信波段的光电子器件很难直接应用中红外波段。此外,由于多声子辅助的带内跃迁吸收,硅基材料的透明窗口不能达到  $7.5 \mu\text{m}$  以上,这限制了硅基光电子器件在长波中红外的应用。因此,在中红外集成光电子的研究中,晶圆与波导的研发是最首要的问题。早在 2006 年,美国空军研究室的 Soref 等<sup>[43]</sup>就分析了采用硅基、锗基、硅锗合金等“IV 族”材料开发各类形状的中红外波导器件的可行性。随后,在 2006—2008 年,英国萨里大学的研究者开发了多种中红外硅基波导器件,然而早期研究所采用的波导器件制作工艺与 CMOS 技术的兼容性较差,对中红外光的吸收损耗较高<sup>[44-45]</sup>。之后,2010—2012 年,美国华盛顿大学研究者、澳大利亚悉尼大学研究者和香港中文大学研究者分别基于 CMOS 技术开发了硅-蓝宝石(silicon-on-sapphire, SOS)波导<sup>[46-48]</sup>和悬空薄膜波导器件<sup>[20]</sup>,解决了氧化埋层对中红外光的吸收问题,中红外波导器件的质量已经接近通信波段器件,吸引了科研工作者对中红外集成光电子的广泛关注<sup>[17-18,49]</sup>。与硅基材料相比,锗基材料具有更高的折射率、更宽的透明窗口以及更高的非线性折射率等优点<sup>[50]</sup>,被认为更适合用于开发长波中红外集成光电子器件。然而,相比中红外硅基光子学,中红外锗基光子学的研究起步较晚,直到 2012 年才报道了第一篇中红外锗基波导的实验论文,随后科研工作者开发了四种类型的锗基晶圆,制作了锗基波导器件。在这一节中,我们将讨论所开发的锗基晶圆的特点和锗基波导器件的研究现状。

### 2.1 锗基晶圆

为了开发锗基晶圆、制作高性能的锗基波导器件,选择合适的基底材料是非常重要的,需要综合考虑其折射率、低光学损耗光谱范围、器件制备工艺复

杂性等因素。目前为止,已经报道了四种锗基晶圆: 锗-硅(germanium-on-silicon, GOS)晶圆<sup>[51]</sup>, 锗-硅-绝缘体(germanium-on-silicon-on-insulator, GOSOI)晶圆<sup>[52]</sup>, 锗-氮化硅(germanium-on-silicon nitride, GOSiN)晶圆<sup>[53]</sup> 以及 锗-绝缘体(germanium-on-insulator, GOI)晶圆<sup>[54]</sup>, 如图 2(a) 所示。其中, GOS 晶圆是最早被开发的,其制作方式是利用化学气相沉积法(chemical vapor deposition, CVD)将锗沉积在硅上<sup>[51]</sup>, 由于锗的折射率比硅的折射率大, 可以将光限制在顶层的锗基波导中。GOS 晶圆制作简单,因而被广泛应用于各种中红外锗基波导器件的开发中<sup>[53]</sup>。随后, GOSOI 晶圆被开发用于研究红外锗基波导器件。相比于 GOS 晶圆, 氧化埋层的存在使得基于 GOSOI 晶圆开发的光电子器件

具有更好的绝热性与绝缘性,更适合用于开发热光调制器件与电光调制器件<sup>[52,55]</sup>。然而,无论是 GOS 晶圆还是 GOSOI 晶圆,都面临着由锗基与硅基材料间的折射率对比度低所引起的器件尺寸较大、集成度低等问题<sup>[53]</sup>。因此,为了提升锗基与衬底材料的折射率对比度,研究者们使用折射率较小的二氧化硅和氮化硅作为衬底开发出了 GOI 晶圆<sup>[54]</sup> 和 GOSiN 晶圆<sup>[53]</sup>。相比氮化硅,二氧化硅材料具有更大的折射率对比度,并且材料应力较小,制作开发更为容易。值得指出的是,二氧化硅和氮化硅的光谱透明窗口较窄,从而限制了 GOI 晶圆和 GOSiN 晶圆在长波中红外波段的应用,可以采用氢氟酸刻蚀底部氧化层的方法,将锗基波导器件的光谱范围拓宽到长波中红外<sup>[56]</sup>。

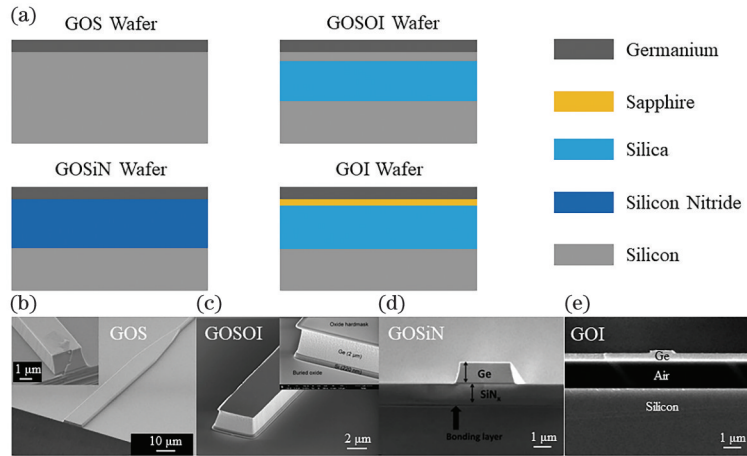


图 2 锗基晶圆的结构示意图及锗基波导的扫描电镜图。(a) 锗基晶圆的结构示意图<sup>[51-54]</sup>; (b) 基于 GOS 晶圆的波导的扫描电镜图<sup>[51]</sup>; (c) 基于 GOSOI 晶圆的波导的扫描电镜图<sup>[52]</sup>; (d) 基于 GOSiN 晶圆的波导的扫描电镜图<sup>[53]</sup>; (e) 基于 GOI 晶圆的波导的扫描电镜图<sup>[56]</sup>

Fig. 2 Structural diagrams of germanium wafers and scanning electron microscope (SEM) images of germanium waveguides. (a) Structural diagrams of germanium wafers<sup>[51-54]</sup>; (b) SEM image of GOS waveguide<sup>[51]</sup>; (c) SEM image of GOSOI waveguide<sup>[52]</sup>; (d) SEM image of GOSiN waveguide<sup>[53]</sup>; (e) SEM image of GOI waveguide<sup>[56]</sup>

## 2.2 锗基波导

与通信波段的波导相比,中红外锗基波导具有更低的瑞利散射光学损耗,但是随着波长的增加,具有高穿透深度的倏逝场会增加波导的辐射损耗以及由衬底材料引起的吸收损耗。此外,锗基晶圆的质量也限制了波导的质量。因此,高性能中红外锗基波导器件的开发面临一定的挑战。世界上首个中红外锗基波导由瑞士洛桑联邦理工学院的研究者于 2012 年在 GOS 晶圆上实现<sup>[51]</sup>。图 2(b) 显示了波导的扫描电镜照片。实验结果证明,波导在 5.8  $\mu\text{m}$  波长处具有 2.5 dB/cm 的传播光学损耗和在 115  $\mu\text{m}$  半径下具有 0.12 dB 的弯曲光学损耗(每 90°)。2015 年,英国南安普顿大学的研究者使用 GOS 晶

圆制作了 3.8  $\mu\text{m}$  波长处具有 0.6 dB/cm 传播光学损耗的波导<sup>[57]</sup>。2016 年,新加坡国立大学的研究者在 GOSOI 晶圆上开发了传播光学损耗为 8 dB/cm 和 3.5 dB/cm 的波导<sup>[52,58]</sup>, 如图 2(c) 所示。为了提高器件集成度,2016 年,新加坡南洋理工大学研究者基于 GOSiN 晶圆制作了波导<sup>[53]</sup>, 如图 2(d) 所示。由于折射率对比度的提高,该波导在 5  $\mu\text{m}$  波长处的弯曲光学损耗仅为 0.14 dB(每 90°)。同年,日本东京大学的研究者基于 GOI 晶圆制作了波导器件,同样具有较低的弯曲光学损耗<sup>[54]</sup>。然而,上述波导器件只能工作在 8  $\mu\text{m}$  波长以下。2015 年,研究者尝试将 GOS 波导扩展到“分子指纹区”,在 7.6  $\mu\text{m}$  波长处获得了 2.5 dB/cm 的



传播光学损耗<sup>[59]</sup>,但在长波中红外的应用将会面临着由衬底材料带来的较大吸收光学损耗的问题。此外,英国格拉斯哥大学的研究者通过优化模式分布来减少基底中光场的能量以减少波导光学损耗<sup>[60]</sup>,但要从根本上消除衬底材料对中红外光的吸收是非常困难的。因此,2017年,日本东京大学的研究者开发了基于 GOI 晶圆的悬空薄膜波导器件<sup>[56]</sup>,如图 2(e)所示。利用氢氟酸通过波导两侧的孔来清洗掉波导下面的氧化层,可以使波导悬

浮在空气中,且其透射窗口只取决于锗基材料本身的透射窗口,极大地拓展了波导的工作波长范围。随后,研究者也将悬空结构引入 GOSOI 晶圆中,制作了用于长波中红外的低损耗波导,其传播损耗达到 2.6 dB/cm<sup>[61]</sup>。但悬浮结构可能会降低器件的机械稳定性,并降低器件的集成度。因此仍需要新的设计和更先进的制作工艺来设计与开发中红外的锗基波导器件。表 1 对比了目前所开发的锗基波导的性能。

表 1 所报道的锗基波导的性能对比

Table 1 Performance comparison among reported germanium waveguides

No.	Platform	Wavelength / $\mu\text{m}$	Loss / $(\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1})$	Structrue type	Year	Ref.
1	GOS	5.8	2.5	Strip	2012	[51]
2	GOS	5.3	3	Strip	2013	[62]
3	GOSOI	5.3	7	Strip	2014	[55]
4	GOS	3.8	0.6	Rib	2015	[57]
5	GOSOI	3.8	8	Strip	2016	[52]
6	GOSOI	3.8	3.5	Strip	2016	[58]
7	GOSiN	3.8	3.35	Strip	2016	[53]
8	GOI	2	14	Rib	2016	[54]
9	GOS	7.6	2.5	Rib	2017	[59]
10	GOSOI	7.6	2.6	Rib	2018	[61]
11	GOS	11.25	10	Rib	2018	[63]
12	GOS	10	1	Rib	2018	[60]

### 3 锗基波导无源器件

基于上述锗基晶圆和波导器件,科研工作者开发了多种中红外锗基无源器件,主要包括:光栅耦合器、微环谐振腔、光子晶体谐振腔、波分复用与解复用器件、偏振旋转器件以及多模干涉器件等。在中红外锗基波导无源器件的研发过程中,一个重要的障碍是基底材料,例如,二氧化硅对中红外光有着强烈的吸收。为了克服这一局限性,传统的 CMOS 工艺中的二氧化硅材料需要被去除或者被其他材料替代。本节将详细阐述锗基波导无源器件的发展过程并讨论其工作性能。

#### 3.1 光栅耦合器

中红外光子芯片的光学封装是一个极富挑战性的工作。目前有两种常用的光场耦合方法:端面耦合和光栅耦合。其中,端面耦合方法利用中红外透镜光纤或者透镜将中红外激光器的光聚焦到波导的端面以实现光场耦合,通常需要借助中红外相机实时捕捉光斑位置,并根据位置来调整耦合系统。但是,目前缺乏商用的透镜光纤,并且中红外透镜和相机设备的成本较高,为光学封装带来了很大的困难<sup>[18]</sup>。相比

端面耦合方法,光栅耦合更适用于中红外光子芯片的光学封装。此外,中红外波段的光栅具有更长的光栅周期,更利于开发亚波长结构,对于降低光栅反射率以及提升光栅效率具有重要意义<sup>[64]</sup>。2015年,研究者首次实现了中红外锗基波导的光栅耦合器,基于 GOS 晶圆制作了一维浅刻蚀光栅<sup>[57]</sup>,如图 3(a)所示。实验结果显示,所开发的光栅耦合器的最大效率为 -16.5 dB。随后,该课题组又基于 GOS 晶圆制作了具有低反射率的光栅耦合器<sup>[65]</sup>。如图 3(b)所示,通过具有低反射率的倒置锥与聚焦光栅耦合器结合的设计,光栅耦合器的后向反射率降低到 -15 dB,同时最大耦合效率提升到 -11 dB。值得指出的是,由于锗基与硅基材料间的折射率对比度低,基于 GOS 晶圆的光栅耦合器的方向性较差且耦合强度较低,其耦合效率被限制。2017年,比利时根特大学的研究者开发了基于 GOSOI 晶圆的光栅耦合器<sup>[66]</sup>,如图 3(c)所示。通过氢氟酸去除光栅耦合器下部的氧化埋层,可以利用硅基材料与空气间的菲涅耳反射来提高光栅耦合器的方向性,进一步通过精细控制硅的厚度,将光栅耦合器的最大效率提升到了 -4 dB。2017年,研究者开发了基于 GOI 悬空薄膜的聚焦亚波长光栅

耦合器<sup>[56]</sup>,如图 3(d)所示。相比 GOS 和 GOSOI 光栅耦合器<sup>[66]</sup>,基于 GOI 悬空薄膜开发的聚焦亚波长光栅耦合器的方向性和耦合强度具有一定程度的提高。实验测量得到的光栅耦合曲线如图 3(e)所示,该耦合器的最大耦合效率为 -11 dB,与理论仿真结果差距较大,这主要是由器件制作工艺和对中红外入射光的偏振控制误差造成的。2018 年,研究者通过优化氧化层厚度,将基于 GOI 的光栅耦合器的效率进

一步提升到 -6.2 dB<sup>[67]</sup>。这是目前关于锗基光栅耦合器的最新报道。与近红外硅基光栅耦合器相比,中红外锗基光栅耦合器的效率还不尽人意。一方面,由于器件制作困难,一些用于提升近红外硅基光栅耦合器效率的方法,例如底层镀金属膜或布拉格光栅工艺,很难用于开发中红外锗基光栅耦合器。另一方面,中红外光栅的周期数比较小,增加了设计非均匀光栅的难度。

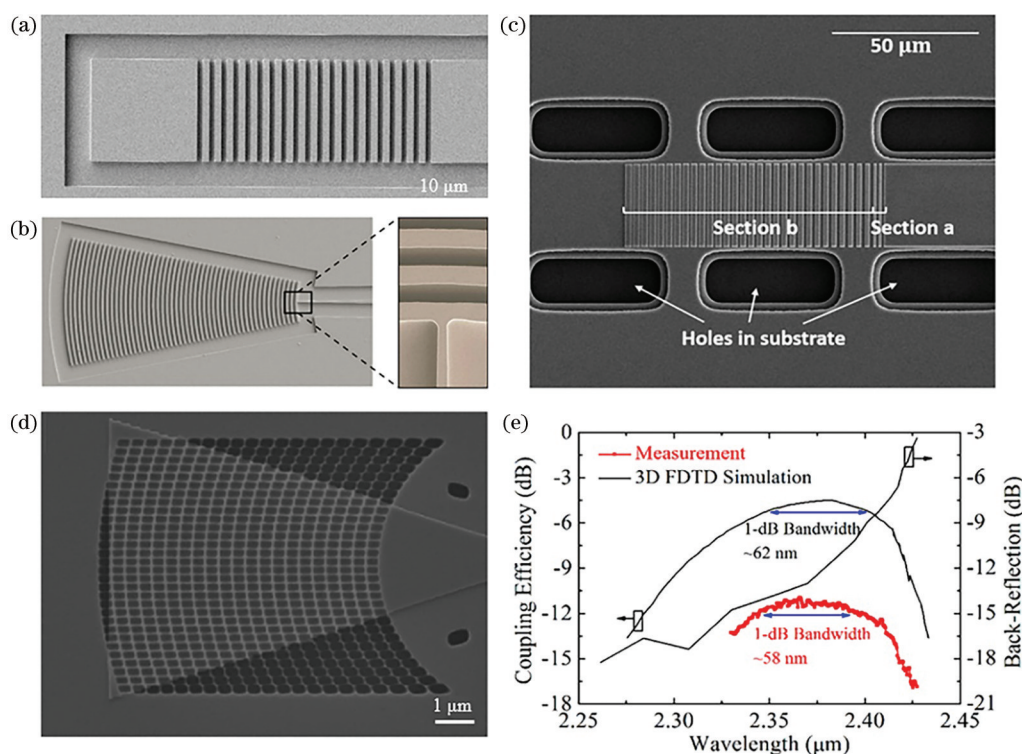


图 3 锗基光栅耦合器。(a)基于 GOS 晶圆的光栅耦合器的扫描电镜图<sup>[57]</sup>; (b)基于 GOS 晶圆的低反射光栅耦合器的扫描电镜图<sup>[65]</sup>; (c)基于 GOSOI 晶圆的光栅耦合器的扫描电镜图<sup>[66]</sup>; (d)基于 GOI 晶圆的聚焦亚波长光栅耦合器的扫描电镜图<sup>[56]</sup>; (e)聚焦亚波长光栅耦合器的理论模拟和实验结果<sup>[56]</sup>

Fig. 3 Germanium grating couplers. (a) SEM image of GOS grating coupler<sup>[57]</sup>; (b) SEM image of GOS grating coupler with low-reflectivity<sup>[65]</sup>; (c) SEM image of GOSOI grating coupler<sup>[66]</sup>; (d) SEM image of GOI focusing subwavelength grating (SWG) coupler<sup>[56]</sup>; (e) simulated and experimental results of GOI focusing SWG<sup>[56]</sup>

### 3.2 微环谐振腔

微环谐振腔是集成光电子中非常重要的无源器件之一,在光通信<sup>[68]</sup>、光传感<sup>[5]</sup>以及非线性光学<sup>[69]</sup>等领域具有广泛的应用。目前已经有许多关于中红外硅基微环谐振腔及其应用的报道,包括电光调制器<sup>[70]</sup>、光学传感器<sup>[18]</sup>以及光学频率梳产生<sup>[71-72]</sup>等,然而,由于中红外锗基波导的研究起步较晚,目前锗基微环谐振器的报道也还比较少。相比硅基器件,锗基波导的光学损耗较高,因此,高品质因子(Q 值)的中红外锗基微环谐振器的开发面临着非常大的挑战。2016 年,英国南安普顿大学的研究者在 GOS 晶圆上实现了游标微环谐振腔<sup>[73]</sup>。如图 4(a)所示,该游标

微环谐振腔由两个具有不同自由光谱范围的微环级联而成,级联后整体的自由光谱范围为两个微环谐振腔自由光谱范围的最小公倍数。相比于单个微环谐振腔,游标微环谐振腔的谱线对外界环境折射率的变化更敏感,更适合传感应用。实验测量得到,该微环谐振腔具有 23 dB 的消光比和 5000 的 Q 值。2018 年,比利时根特大学的研究者在 GOSOI 晶圆上制作了一种可热光调谐的游标微环谐振腔<sup>[74]</sup>。实验测量得到,该微环谐振腔具有 20000 的 Q 值、20 dB 的消光比以及 5 dB 的光学插入损耗。同年,日本东京大学的研究者基于 GOI 晶圆制作了一个微环谐振腔,如图 4(b)所示,所开发的微环谐振腔

直径为  $14\ \mu\text{m}$ <sup>[67]</sup>。由于波导的光学损耗较高 ( $20\ \text{dB}/\text{cm}$ )，该微环谐振腔的  $Q$  值仅为 170。2018 年，日本东京大学的研究者基于 GOI 晶圆制作了一个高  $Q$  悬空薄膜微环谐振腔<sup>[75]</sup>。如图 4(c) 所示，波导两侧设计了空气孔，允许氢氟酸进入并蚀刻波导下方的氧化埋层，从而实现悬空薄膜结构。该微

环谐振器具有  $35\ \mu\text{m}$  的直径，通过聚焦亚波长光栅耦合器实现光场耦合。图 4(d)~(e) 显示了该微环谐振器的实验结果，可以看出所报道的微环谐振器具有  $22\ \text{dB}$  的消光比、 $4.3\ \text{nm}$  的自由光谱范围和  $57000$  的  $Q$  值，是目前为止所报道的  $Q$  值最高的锗基微环谐振腔。

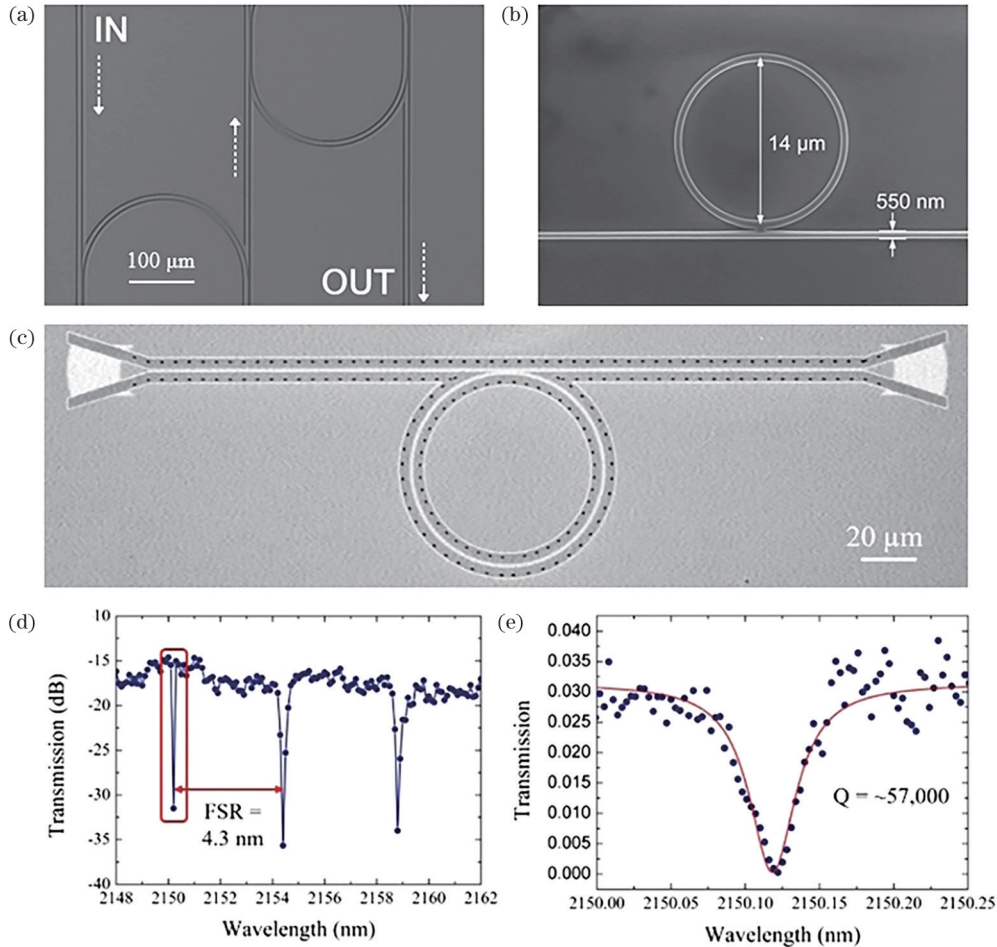


图 4 锗基微环谐振腔。(a) 基于 GOI 晶圆的可调谐游标微环谐振腔的扫描电镜图<sup>[73]</sup>；(b) 基于 GOI 晶圆的微环谐振腔的扫描电镜图<sup>[67]</sup>；(c) 基于 GOI 晶圆的高  $Q$  微环谐振腔的扫描电镜图<sup>[75]</sup>；(d) 基于 GOI 晶圆的高  $Q$  微环谐振腔的自由光谱范围测量<sup>[75]</sup>；(e) 基于 GOI 晶圆的高  $Q$  微环谐振腔的  $Q$  值测量<sup>[75]</sup>

Fig. 4 Germanium microring resonators. (a) SEM image of GOI vernier-effect microring resonator<sup>[73]</sup>；(b) SEM image of GOI microring resonator<sup>[67]</sup>；(c) SEM image of GOI high- $Q$  factor microring resonator<sup>[75]</sup>；(d) free spectral range measurement of GOI high- $Q$  factor microring resonator<sup>[75]</sup>；(e)  $Q$  factor measurement of GOI high- $Q$  microring resonator<sup>[75]</sup>

### 3.3 光子晶体谐振腔

近年来，光子晶体谐振腔也得到了越来越多的关注，并且取得了很多卓越的成果，包括单光子发射器<sup>[76]</sup>、低阈值纳米激光器<sup>[77]</sup>以及非线性光频率产生<sup>[78]</sup>等。相比于微环谐振腔，光子晶体谐振腔具有更高的品质因子与模体积比 ( $Q/V$ )，这使得其在增强光与物质相互作用的方面具有很强的优势。锗基光子晶体谐振腔最先在近红外波段开发设计。2008 年，巴黎第十一大学的研究者制作了一个 L3 型光

子晶体谐振腔，在  $1.6\ \mu\text{m}$  波长处，该腔具有 540 的  $Q$  值<sup>[79]</sup>。随后，日本东京大学的研究者也报道了一个工作在  $1.7\ \mu\text{m}$  波长处的 L3 型光子晶体谐振腔<sup>[80]</sup>，实验测量与理论仿真的结果显示，该腔具有 1350 的  $Q$  值和  $0.0537\ \mu\text{m}^3$  的模体积，与之前的结果相比，具有更高的模体积比。2017 年，研究者报道了首个中红外锗基光子晶体谐振腔<sup>[81]</sup>。所设计的腔是在 GOI 晶圆上采用悬空薄膜波导制作的，如图 5(a) 所示。理论仿真结果显示：该腔具有两个不



同 Q 值的谐振峰,调整周期孔之间的间距,可以使两个共振峰以不同速度红移并在波长  $2.34 \mu\text{m}$  处发生干涉,形成 Fano 共振,如图 5(b)所示。图 5(c)显示了其实验结果,透射谱显示了 Fano 共振的存在并具有 200 的 Q 值。随后,2018 年,他们进一步报道了一个具有超高 Q 值的纳米臂光子晶体谐振

腔<sup>[82]</sup>。如图 5(d)所示,该腔同样是基于 GOI 晶圆开发的,其中,光子晶体中孔的直径的缓慢变化逐渐改变了有效折射率,束缚了光场能量。图 5(e)显示了该腔的实验测试结果,通过洛伦兹线型的拟合,得到该腔具有 18000 的 Q 值,是目前中红外锗基光子晶体腔的最高纪录。

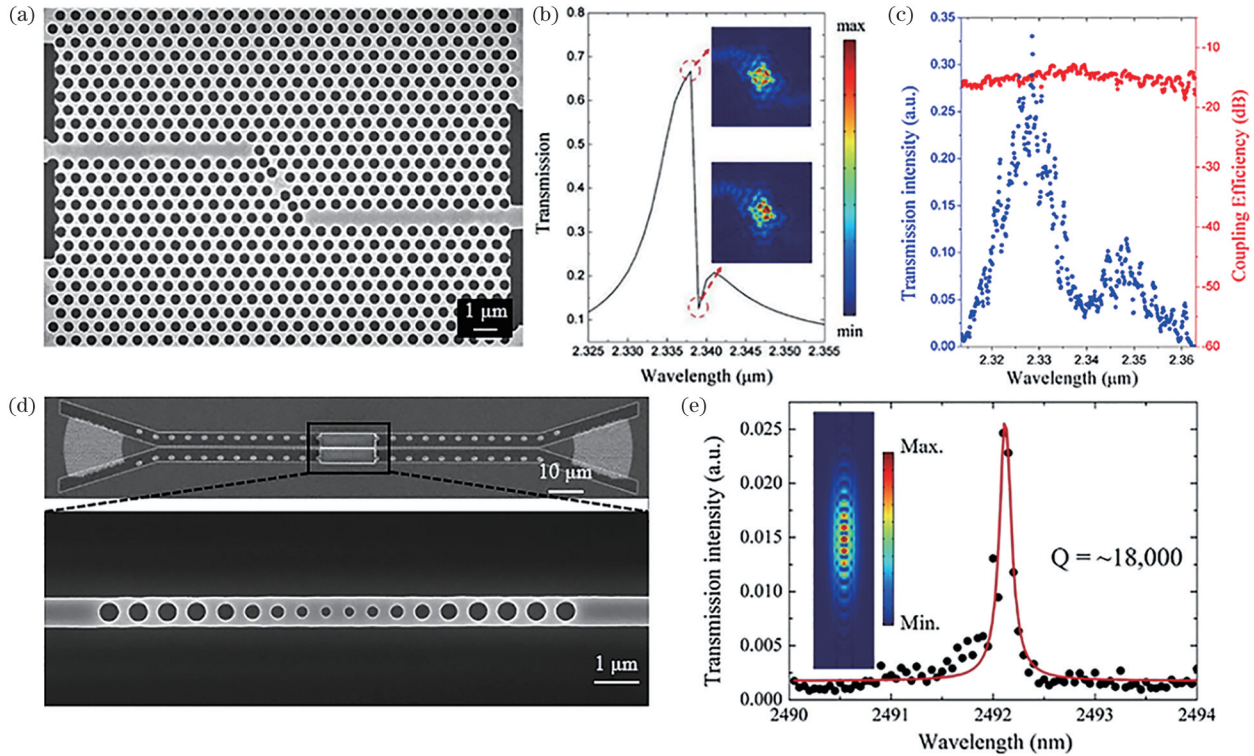


图 5 锗基光子晶体谐振腔。(a)基于 GOI 晶圆的锗基光子晶体谐振腔的扫描电镜图<sup>[81]</sup>; (b)基于 GOI 晶圆的锗基光子晶体谐振腔的理论仿真结果<sup>[81]</sup>; (c)基于 GOI 晶圆的锗基光子晶体谐振腔的实验测量结果<sup>[81]</sup>; (d)基于 GOI 晶圆的锗基纳米臂光子晶体谐振腔的扫描电镜图<sup>[82]</sup>; (e)基于 GOI 晶圆的锗基纳米臂光子晶体谐振腔的实验测量结果<sup>[82]</sup>

Fig. 5 Germanium photonic crystal cavities. (a) SEM image of germanium photonic crystal cavity<sup>[81]</sup>; (b) simulated results of germanium photonic crystal cavity<sup>[81]</sup>; (c) measurement results of germanium photonic crystal cavity<sup>[81]</sup>; (d) SEM image of germanium photonic crystal nanobeam cavity<sup>[82]</sup>; (e) measurement results of germanium photonic crystal nanobeam cavity<sup>[82]</sup>

### 3.4 其他无源器件

除了上述无源器件外,科研工作者还报道了其他锗基无源器件,为实现片上光路集成奠定了基础。2013 年,研究者在 GOS 晶圆上演示了一种中红外锗基的波分复用器<sup>[62]</sup>。该波分复用器采取阵列波导光栅(arrayed waveguide grating, AWG)结构,具有 36 根波导、5 个输出信道和 200 GHz 的工作带宽。实验测试表明:该复用器对横电( $\text{TE}_0$ )模具有 2.5 dB 的插入光学损耗和 -20 dB 的串扰,对横磁( $\text{TM}_0$ )模具有 3.1 dB 的插入光学损耗和 -16 dB 的串扰。另一种波分复用器的结构是凹型平板光栅(planar concave grating, PCG)。2013 年,研究者基于 PCG 结构开发了一个具有更大信道间隔的中

红外锗基波分复用器<sup>[83]</sup>。实验结果表明:该复用器在  $\text{TE}_0$  和  $\text{TM}_0$  模式下分别具有 7.6 dB 和 6.4 dB 的插入光学损耗以及 -27 dB 和 -21 dB 的串扰。相比于 AWG 型复用器,该复用器具有较大的插入光学损耗,这是光栅较低的反射导致的。进一步,该课题组又在光栅背面设计了分布布拉格反射镜(distributed Bragg reflector, DBR)以提高光栅的反射。改进后,复用器在  $\text{TE}_0$  和  $\text{TM}_0$  模式下的插入光学损耗分别降低到 4.9 dB 和 4.2 dB。除了波分复用器以外,2015 年,研究者还报道了基于 GOS 晶圆的  $1 \times 2$  和  $2 \times 2$  的多模干涉(multimode interference, MMI)耦合器<sup>[57]</sup>。实验结果显示:两个 MMI 耦合器分别具有 0.21 dB 和 0.37 dB 的光学损

耗。2018 年,日本东京大学的研究者报道了基于 GOS 晶圆的  $1 \times 2$  多模干涉耦合器,其光学损耗仅有 0.5 dB<sup>[67]</sup>。2020 年,研究者报道了一个基于 GOS 的偏振旋转器<sup>[84]</sup>。使用绝热中心对称和反演对称的波导锥结构,可以实现波导模式从  $TM_0$  变为  $TE_0$  的转换,在  $9 \sim 11 \mu\text{m}$  波长范围内具有大于 15 dB 的消光比,并且光学损耗小于 1 dB。

## 4 锗基波导有源器件

有源器件(如激光器、调制器和探测器)是集成光电子的关键组成部分。为了实现锗基材料的中红外发光,一方面需要将锗基材料的带隙结构改为直接带隙,另一方面还需要减小带隙宽度,这是具有挑战性的材料工程问题。此外,锗基材料在中红外波段是透明材料,只能通过多光子吸收实现光电探测,探测效率较低,目前报道比较少。在本节中,我们主要针对中红外锗基激光器和调制器的研究进展进行讨论。

### 4.1 激光器

锗基波导激光器的开发是具有挑战性的。由于

锗基材料是间接带隙半导体,其发光效率非常低,无法直接将锗基波导作为激光增益介质。目前,科研工作者采用了三种方法来改进锗基材料的发光效率和增益特性。第一种方法是通过 n 型重掺杂具有轻微双轴应变的锗基材料,实现粒子数反转<sup>[85]</sup>。第二种方法是将锡掺入锗中制成锡锗合金。由于锡的掺杂,材料的能带结构从间接带隙变为直接带隙,提升了发光效率<sup>[86]</sup>。但是,这两种方法都面临着激光阈值较高的问题。因此,研究者们又开发了第三种方法:利用拉伸应变改变锗基材料能带结构<sup>[87]</sup>。施加一个强的应力不仅可以改变锗基材料的能带结构为直接带隙,还可以通过调整应力的大小来控制带隙的大小<sup>[88]</sup>。此外,具有高应变的微盘、微桥谐振腔结构也被实验证明<sup>[89-90]</sup>,为激光器的实现奠定了基础。2016 年,美国斯坦福大学的研究者基于 GOI 晶圆制作了锗基光源,基于拉伸应变为 2.3% 和 Q 值为 2000 的锗基纳米谐振腔,实现了  $2 \mu\text{m}$  波长的中红外发光<sup>[91]</sup>。2017 年,新加坡南洋理工大学的研究者报道了一个低阈值锗基激光器<sup>[92]</sup>。如图 6(a)所示,该激

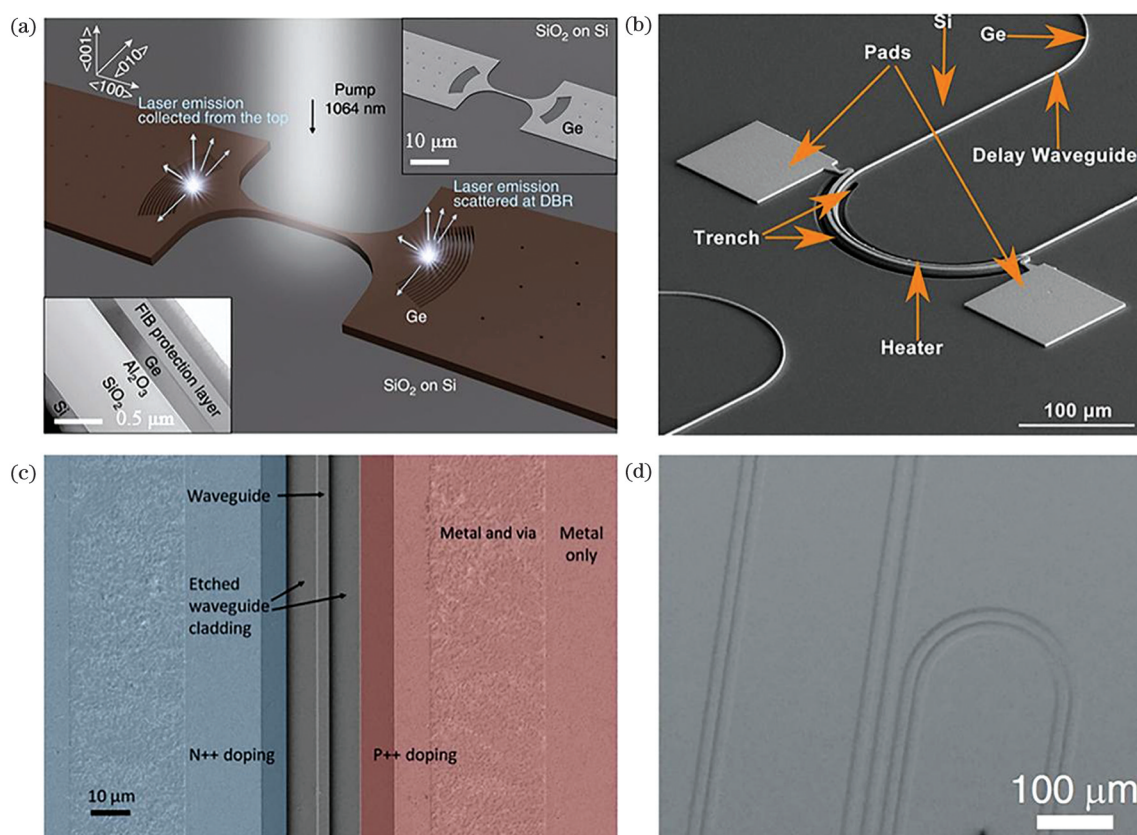


图 6 锗基波导有源器件。(a)低阈值锗基激光器的结构示意图及扫描电镜图<sup>[92]</sup>; (b)锗基热光相移器的扫描电镜图<sup>[95]</sup>; (c)锗基掺杂 PIN 结的强度调制器的扫描电镜图<sup>[98]</sup>; (d)锗基全光调制器扫描电镜图<sup>[99]</sup>

Fig. 6 Germanium waveguide active devices. (a) Structural diagram and SEM image of low-threshold germanium nanowire laser<sup>[92]</sup>; (b) SEM image of germanium thermal phase shifter<sup>[95]</sup>; (c) SEM image of germanium modulator with PIN diode<sup>[98]</sup>; (d) SEM image of germanium all-optical modulator<sup>[99]</sup>



光器基于 GOI 晶圆,以单轴拉伸应变为 1.6% 的锗基材料作为增益介质,利用两个分布反馈布拉格(distributed feedback Bragg, DFB)光栅构成谐振腔,通过光泵浦实现激光发射。实验证明,该激光器具有  $3.0 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  的激光阈值。但是,该激光器工作波长仍旧在近红外波段。实现中红外波段的辐射则需要提供更高的拉伸应变。2016 年,研究者利用拉伸应变大于 2% 的锗基微盘,实现了发射波长大于  $2.3 \mu\text{m}$  的光致荧光发射<sup>[93]</sup>。2019 年,瑞士保罗谢尔研究所的研究者开发了中红外的锗基激光器<sup>[94]</sup>。所设计的激光器采用拉伸应变为 5.4%~5.9% 的锗作为增益介质,实现了  $3.20 \sim 3.66 \mu\text{m}$  波长的激光发射。

#### 4.2 调制器

中红外锗基波导调制器的研究近年来也取得了一定的进展。由于锗基材料是中心反演对称晶体,几乎不具有电光效应,因此,利用电光效应实现锗基电光调制器的开发是比较困难的,只能选择其他效应来实现光场调制。首先,科研工作者实现了利用热光效应的电光调制。因为锗具有高折射率以及热光系数<sup>[55]</sup>,所以调制效率较高,但受限于较长的热弛豫时间,基于热光效应的调制器的工作带宽受限。目前,科研工作者已经报道了高性能热光相移器,如图 6(b)所示的锗基热光相移器<sup>[95]</sup>以及可调谐滤波器<sup>[74,96-97]</sup>。其次,由于锗具有非常强的载流子吸收效应,利用载流子对光的吸收也可以实现强度调制。另外,载流子寿命相比热弛豫时间小三个数量级,因此,所开发的调制器具有更高的调制速度。2016 年,研究者制作了具有 PIN 结的 GOI 波导器件<sup>[54]</sup>。当给 PIN 结施加正向电压时,注入的载流子对光产生吸收,从而在  $2 \mu\text{m}$  波长处实现了对光场强度的调制。2019 年,研究者用同样的方法在  $8 \mu\text{m}$  波长处实现了光场强度的调制<sup>[98]</sup>。图 6(c)显示了所开发的器件,对锗基材料进行掺杂以构成 PIN 结,通过施加偏置电压,实现光场强度的调制。2015 年,英国南安普顿大学的研究者报道了基于多光子吸收产生的自由载流子改变波导光学损耗效应的 GOS 全光调制器<sup>[99]</sup>,如图 6(d)所示。进一步,2015 年,该课题组还开发一种基于双光子吸收的全光调制器<sup>[100]</sup>。该调制器利用  $1.9 \mu\text{m}$  波长的脉冲光作为泵浦光,通过双光子吸收作用调制信号光,因此,调制器的速率依赖于脉冲宽度与双光子响应速率,而非载流子寿

命,响应时间可达到皮秒量级。

## 5 生物化学传感的应用研究

中红外吸收光谱在生物化学分子传感中具有非常广泛的应用。根据光谱范围,中红外吸收光谱可以分为“官能团区”(2~ $7.5 \mu\text{m}$ )吸收光谱和“分子指纹区”(7.5~ $20 \mu\text{m}$ )吸收光谱<sup>[101]</sup>。在官能团区,每一个红外吸收峰都对应着一个特定的官能团,通过检测红外吸收谱线,可以识别特定分子键存在的官能团。在“分子指纹区”中,红外吸收谱线非常复杂,其反映了与分子整体结构相关的所有振动,通过检测红外吸收谱线,可以识别分子的种类和含量。科研工作者首先用硅基材料开发了多种工作在“官能团区”的生物化学分子传感器,由于硅基材料对  $8 \mu\text{m}$  以上的中红外光会产生多声子辅助的吸收作用<sup>[18]</sup>,因此,硅基波导器件传感器无法工作在“分子指纹区”,在这一波段,锗基波导器件具有非常明显的优势。

目前,锗基波导光学传感器的研究还处于初始阶段,相关报道比较少。2016 年,研究者理论设计了一种基于石墨烯-锗悬空薄膜狭缝波导的二氧化氮气体传感器<sup>[102]</sup>。他们将石墨烯结构集成在锗基波导上以形成布拉格光栅,气体分子接触石墨烯后,石墨烯的介电常数发生改变,从而导致布拉格光栅带宽的改变,通过测量带宽的改变量,即可得知待测气体的浓度,灵敏度可以达到  $1 \times 10^{-6}$ 。2018 年,研究者在 GOSiN 晶圆上制作了螺旋波导传感器,用于检测异丙醇与丙酮混合溶液中异丙醇的浓度<sup>[103]</sup>。将待测液体滴到传感器芯片表面后,通过测量待测液体中异丙醇对波导传播光的吸收损耗来检测其浓度,检测极限可以达到 5%。2019 年,英国南安普顿大学的研究者利用 GOS 波导测量了牛血清蛋白在中红外分子指纹区的吸收光谱<sup>[104]</sup>。图 7(a)显示了其测量装置的示意图,带有牛血清蛋白的磷酸盐缓冲盐水顺着滤纸流过锗基波导,通过测量透射光的光谱,可以得到牛血清蛋白的三个特征峰。实验结果显示,该装置可以测量浓度为  $0.1 \sim 100 \text{ mg/mL}$  的牛血清蛋白。2020 年,研究者利用 GOS 波导研究了牛血清蛋白及其聚集体的红外吸收光谱<sup>[105]</sup>,通过对红外谱的分析,可以识别出带有毒性的聚集体,对疾病的早期诊断具有一定的意义。图 7(b)和图 7(c)分别显示了其实验装置照片和系统示意图。

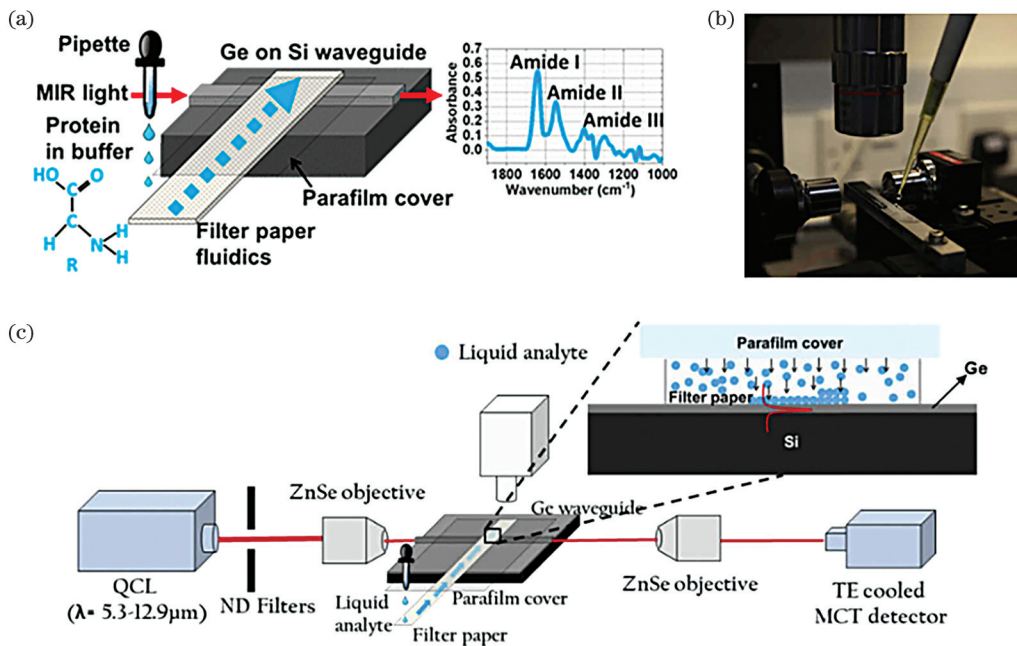


图 7 用于生物化学传感研究的锗基波导器件。(a) 锗基波导测量牛血清蛋白吸收光谱的实验原理图<sup>[104]</sup>; (b) 锗基波导测量牛血清蛋白及其聚集体吸收光谱的系统照片<sup>[105]</sup>; (c) 锗基波导测量牛血清蛋白及其聚集体吸收光谱的系统示意图<sup>[105]</sup>

Fig. 7 Germanium waveguide devices used for biochemical sensors. (a) Experimental principle of infrared absorption spectroscopic measurement of bovine serum protein (BSA) using germanium waveguide<sup>[104]</sup>; (b) system image for infrared absorption spectrum measurement of BSA and aggregates using germanium waveguide<sup>[105]</sup>; (c) schematic of infrared absorption spectrum measurement of BSA and aggregates using germanium waveguide<sup>[105]</sup>

## 6 非线性光学的应用研究

目前,可集成应用的中红外激光器以带间级联激光器(interband cascade lasers, ICLs)和量子级联激光器(quantum cascade lasers, QCLs)为主,然而其在光谱带宽,线宽、波段等方面还有待进一步完善,并且其制作工艺与 CMOS 工艺不完全兼容,因此研究者们致力于采用非线性光学的方法,研究开发片中红外相干光。锗基材料具有非常丰富的非线性效应,包括克尔非线性效应、多光子吸收、拉曼与布里渊非弹性光散射等。科研工作者对锗基材料进行了大量的研究。2011年,美国明尼苏达大学的研究者实验测量了锗基材料在 2.8~5.2 μm 波长范围内的双光子与三光子吸收系数以及载流子吸收系数<sup>[106]</sup>。2013年,美国麻省理工学院的研究者利用之前测得的锗的三阶极化率<sup>[38]</sup>,计算了锗在 2.3~14 μm 波长范围内的非线性折射率和双光子吸收系数<sup>[50]</sup>。2015年,研究者理论研究了锗中载流子吸收与载流子色散效应,实验测试了锗基材料在 2~16 μm 波长范围内的载流子吸收与色散系数<sup>[107]</sup>。2017年,研究者实验测量了锗基材料在 5 μm 波长范围内的多光子吸收系数与非线性折射率<sup>[108]</sup>。值

得指出的是,上述实验研究主要是针对锗基材料进行的,当锗基材料被制作成波导器件后,非线性系数可能会因为光场强度和应力的变化而改变,因此测量锗波导的非线性系数是非常有意义的。目前,有关锗基波导器件非线性特性的实验报道还比较少,2015年,研究者测试了 GOS 波导中的双光子吸收系数,所测波长范围覆盖了 1.9~3.7 μm<sup>[100]</sup>。图 8(a)显示了其测试结果,锗基波导在这个波长范围内具有更高的双光子吸收,约为硅基波导的 1000 倍。

相比实验研究,锗基波导器件的理论研究成果则更为显著。2015年,意大利巴里理工大学的研究者理论研究了锗基波导三次谐波的产生,其利用锗基波导的三阶非线性效应,将 10.6 μm 的光三倍频到 3.53 μm,理论效率可以达到 -35.68 dB<sup>[109]</sup>。2016年,研究者理论研究了锗基波导中二次谐波的产生<sup>[110]</sup>。由于锗基材料缺乏二阶非线性效应,该课题组设计了氮化硅包裹的具有拉伸应变的锗基波导,通过改变材料的对称性,产生二阶非线性效应。理论结果显示,所设计的波导具有 0.6% 的转换效率。除了高次谐波产生,锗基材料中非常强烈的光弹效应也吸引了人们对受激布里渊散射的关注。2014年,澳洲悉尼大学的研究者理论研



究了锗基波导中后向布里渊散射的增益<sup>[111]</sup>。如图 8(b)所示,所设计的锗基波导被包围在氮化硅中,通过控制波导尺寸,实现光波与声波之间的相位匹配条件。理论计算结果显示,所设计的波导具有  $1000 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  的布里渊增益。2016 年,研究者理论研究了锗基波导布里渊激光器<sup>[112]</sup>,其采用跑道谐振腔来产生布里渊激光。除了受激布里渊散射外,2015 年,该课题组还理论研究了锗基波导拉曼激光器<sup>[113]</sup>。图 8(c)展示了在连续光与脉冲光泵浦下锗基波导中拉曼激光形成的动力学过程。

克尔非线性宽带相干光源近年来受到了越来越多的关注,其具有丰富等间距的光学频率分量,因此被用于大规模通信、气体传感、相干成像、激光雷达和并行计算等领域中<sup>[114-115]</sup>。锗基材料具有非常高的非线性折射率<sup>[50]</sup>,比硅基材料高一个数量级,然而其多光子吸收系数也远超于硅基材料,因此在锗

基波导中实现克尔非线性宽带相干光源是一个具有挑战性的研究。克尔非线性宽带相干光源通常分为超连续谱和克尔光频梳。在超连续谱研究方面,2015 年,研究者基于 GOS 晶圆理论,研究了超连续谱的产生,并通过求解广义非线性薛定谔方程,证明了波导在波长为  $4 \mu\text{m}$  的脉冲光泵浦下可以产生  $1.34 \mu\text{m}$  宽的超连续谱<sup>[116]</sup>。2017 年,香港理工大学的研究者理论研究了基于 GOS 悬空波导的超连续谱产生,理论计算所得的超连续谱跨过了 2.6 个倍频程<sup>[117]</sup>。2021 年,法国里昂大学的研究者首次在实验中观察到了 GOS 波导的超连续谱产生<sup>[118]</sup>。图 8(d)显示了超连续谱实验结果,可以看出,在波长为  $4.6 \mu\text{m}$  的脉冲泵浦光泵浦下,波导中产生了超连续谱。当平均功率达到 22 mW 时,产生的超连续谱波长覆盖了  $3.39 \sim 6.02 \mu\text{m}$  波段。但受制于锗基波导的三光子吸收作用,他们并未获得超越一个倍频程的带宽。

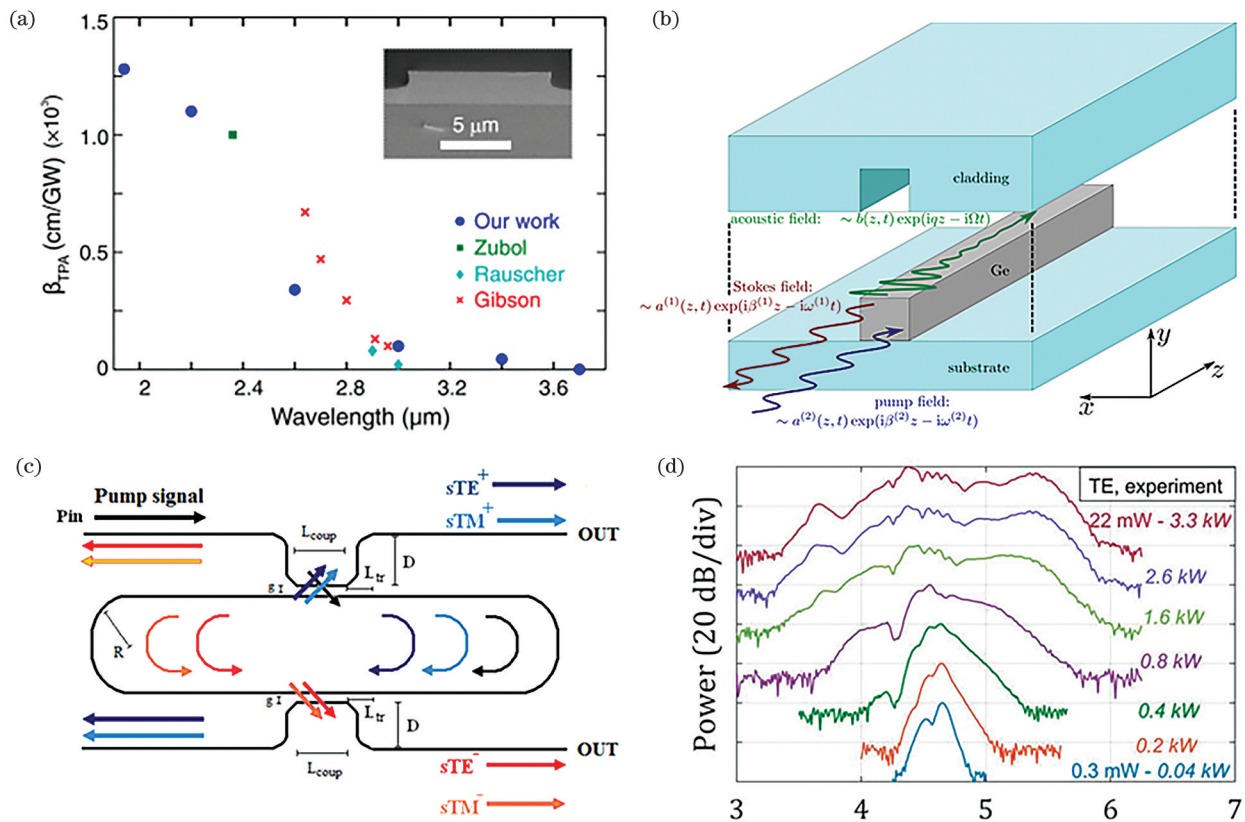


图 8 锗基波导器件的非线性光学研究。(a)GOS 波导中双光子吸收系数的测量结果<sup>[100]</sup>; (b)受激布里渊散射的示意图<sup>[111]</sup>; (c)拉曼激光器的结构示意图<sup>[113]</sup>; (d)超连续谱产生的实验结果<sup>[118]</sup>

Fig. 8 Nonlinear optical study of germanium waveguide devices. (a) Measurement results of two-photon absorption coefficient of GOS waveguide<sup>[100]</sup>; (b) schematic of stimulated Brillouin scattering<sup>[111]</sup>; (c) structural diagram of Raman laser<sup>[113]</sup>; (d) experimental results of supercontinuum generation<sup>[118]</sup>

相比超连续谱,克尔光频梳具有体积小、单一波长泵浦的特点,具有大规模片上集成的优势。由于克

尔光频梳的产生对微环谐振腔的品质因子要求很高,目前还未有锗基微环谐振腔光频梳的实验报道。在

理论研究方面,2018 年,天津大学的研究者通过对锗基波导进行色散调控并数值求解 Lugiato-Lefever 方程,在理论上计算了跨越两个倍频程的克尔光频梳<sup>[119]</sup>。多光子吸收随着波长的增大是逐渐减小的,计算过程考虑到泵浦波长较长,而忽略了多光子系数与载流子效应。这种近似处理在长波中红外波段是合理的,但对于短波中红外波段来说会有较大的误差。因此,对于短波中红外波段来说,锗基微环谐振器能否产生光频梳还需要探讨。在近期的研究中,我们的课题组讨论了在短波中红外波段锗基光频梳产生的可能性。图 9(a) 显示了所设计的光频梳模型的结构以及波导的色散曲线。为了使求解结果更贴近真实情况,该模型考虑了锗基材料的双光子吸收、自由载流子吸收、自由载流子色散等效应。当波长大于

3.2  $\mu\text{m}$  时,锗基材料的双光子吸收会从直接带隙吸收变成间接带隙吸收,从而导致双光子吸收系数随波长的增加而急剧下降。我们采用不同波长的泵浦光来观察光频梳产生的情况,图 9(b)~(c) 显示了光频梳形成过程中不同时刻腔内光场的时域与光谱曲线。当波长为 2.8  $\mu\text{m}$  时,在仅考虑锗双光子吸收而不考虑载流子吸收与色散时,腔内光场一直处于连续光状态,这意味着光频梳无法产生。当泵浦波长为 3.5  $\mu\text{m}$  时,在同时考虑双光子吸收与载流子吸收与色散后,通过调整载流子寿命,可以明显地观察到腔内光场从连续态转变到孤子态,显示了光频梳的产生。因此,基于锗基波导的中红外克尔光谱的泵浦波长不应低于 3.5  $\mu\text{m}$ ,还需利用反向偏压的 PIN 结来减少载流子引起的吸收光学损耗<sup>[120]</sup>。

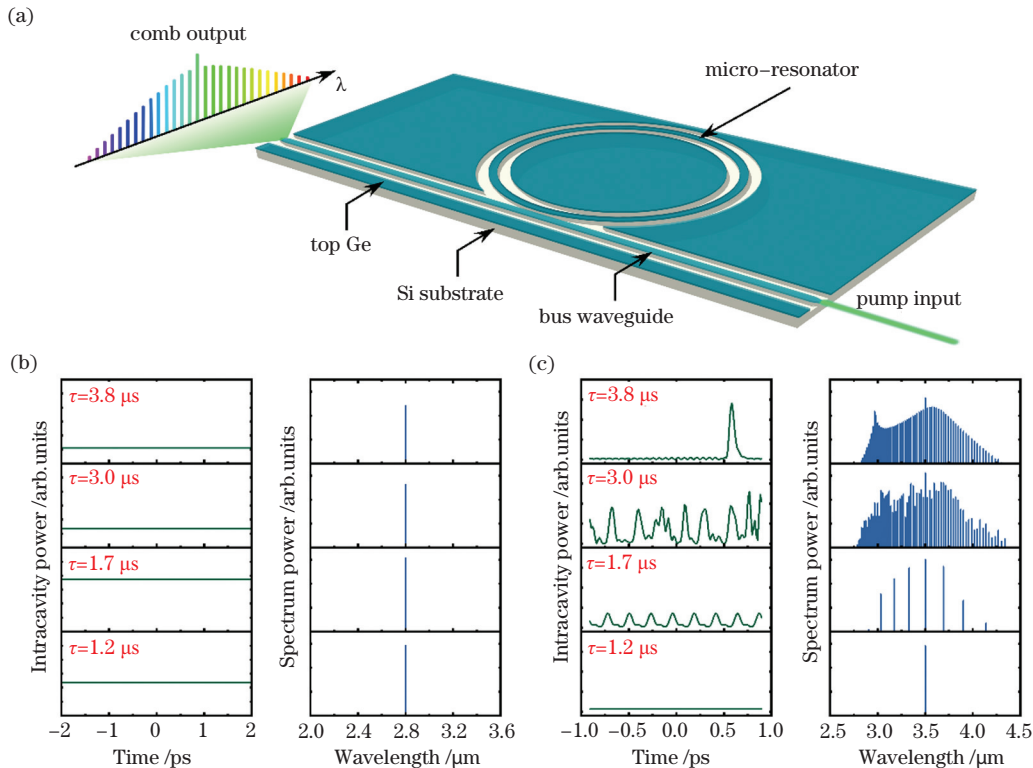


图 9 中红外锗基克尔光频梳的理论仿真结果。(a) 锗基克尔光频梳模型的结构示意图;(b) 泵浦波长为 2.8  $\mu\text{m}$  时腔内光场时域与光谱曲线;(c) 泵浦波长为 3.5  $\mu\text{m}$  时腔内光场时域与光谱曲线

Fig. 9 Simulated results of mid-infrared germanium Kerr frequency comb. (a) Structural diagram of germanium Kerr frequency comb model; (b) temporal and spectral curves of intra-cavity field with pump wavelength of 2.8  $\mu\text{m}$ ; (c) temporal and spectral curves of intra-cavity field with pump wavelength of 3.5  $\mu\text{m}$

## 7 结束语

综述了基于“IV 族”材料的中红外集成光电子的研究进展,重点讨论了中红外锗基光子学的发展历程和前沿进展。内容涵盖光栅耦合器、微环谐振腔、光子晶体谐振腔等无源锗基波导器件,激光器和电光调制器等有源锗基波导器件,以及中红外锗基

器件在生化传感和非线性光学中的应用。相比通信波段,中红外集成光学研究尚处于起步阶段,相关研究主要停留在分立的器件研发阶段,片上系统集成还非常困难,具有广阔的发展空间。

第一,开发高性能的无源器件。中红外光学器件的特征尺寸通常较大,在现有的微纳加工技术条件下,具备更加灵活的光场调控能力。在通信波段



已经被深入研究的光子器件,如亚波长器件<sup>[121]</sup>、光子晶体器件<sup>[122]</sup>、逆向设计器件<sup>[123]</sup>等,均可在中红外波段设计开发,并具备更好的设计加工容差。然而,由于中红外波段采用的氟化物或硫化物光纤的机械加工性能较差<sup>[124-125]</sup>,中红外器件的光学封装仍存在一定的挑战。

第二,开发异质集成的中红外光电器件。近年来,各类新型中红外光电半导体材料层出不穷,例如石墨烯、黑磷等低维材料<sup>[126]</sup>,在室温条件下就可以制备出高性能的光电器件,且与硅基波导集成时,不存在晶格失配所引起的器件性能下降问题。因此,可以尝试探索开发低维材料与波导集成的光电探测器,以解决目前片上集成的中红外探测器的制作技术与 CMOS 技术无法完全兼容的问题。然而,现有的小型化中红外激光器还是以带间级联激光器<sup>[127]</sup>和量子级联激光器<sup>[128]</sup>为主,实现中红外激光器与硅基波导器件的片上集成难度较大<sup>[129]</sup>。

第三,开发中红外非线性光学和量子光学的应用。在中红外波段,光子能量较小,多光子吸收效应较弱,并且由瑞利散射引起的波导光学损耗较低<sup>[2]</sup>,因此,与通信波段相比,中红外集成光学器件具有更低的光学损耗,有望开发非线性光源和量子光源以弥补带间级联激光器和量子级联激光器在光谱带宽和光子相干性等方面的不足。然而,在中红外波段,材料的非线性较通信波段更弱,平衡波导光学损耗的优化和非线性效应的劣化是实现高效率非线性光学器件的关键。

第四,开发中红外“分子指纹区”的光谱和传感应用。目前中红外集成光学的应用主要集中在波长  $8\ \mu\text{m}$  以下的“官能团区”<sup>[5]</sup>,在中红外“分子指纹区”开发中红外集成光学器件是一个前沿方向,其在病理分析、国防安全、远程遥感等领域具有重要的应用前景。在中红外“分子指纹区”,硅基材料的光学吸收很强,不适于开发集成光路,锗基材料和锗锡合金材料<sup>[130]</sup>在这一波段极具前景,而这方面的研究目前刚刚起步。

总之,我们希望能够为中红外光学、集成光电子、光电材料、光谱和传感等领域的研究者提供有用的参考资料,并吸引更多科研工作者关注中红外集成光学的发展。

### 参 考 文 献

- [1] Haldar S K. Photogeology, remote sensing and geographic information system in mineral exploration [M] // Mineral exploration. Amsterdam: Elsevier, 2013: 95-115.
- [2] Jalali B. Nonlinear optics in the mid-infrared [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 506-508.
- [3] Ottonello-Briano F, Errando-Herranz C, Rödjegård H, et al. Carbon dioxide absorption spectroscopy with a mid-infrared silicon photonic waveguide [J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 109-112.
- [4] Dehzangi A, Li J K, Razeghi M. Band-structure-engineered high-gain LWIR photodetector based on a type-II superlattice [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 17.
- [5] Wu J W, Yue G C, Chen W C, et al. On-chip optical gas sensors based on group-IV materials [J]. ACS Photonics, 2020, 7(11): 2923-2940.
- [6] Wei C, Shi H X, Luo H Y, et al. Research progress of pulsed mid-infrared fiber lasers using two-dimensional materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703009.  
韦晨, 史红霞, 罗鸿禹, 等. 基于二维材料调制的中红外脉冲光纤激光器的研究进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703009.
- [7] Hu M L, Cai Y. Research progress on mid-infrared ultrafast fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500009.  
胡明列, 蔡宇. 中红外波段超快光纤激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500009.
- [8] Miller S E. Integrated optics: an introduction [J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(7): 2059-2069.
- [9] Stanley R. Plasmonics in the mid-infrared [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 409-411.
- [10] Hiramatsu N, Kusa F, Imasaka K, et al. Propagation length of mid-infrared surface plasmon polaritons on gold: Impact of morphology change by thermal annealing [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(17): 173103.
- [11] 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.
- [12] Gai X, Choi D Y, Madden S, et al. Supercontinuum generation in the mid-infrared from a dispersion-engineered  $\text{As}_2\text{S}_3$  glass rib waveguide [J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3870-3872.
- [13] Fedeli J M, Nicoletti S. Mid-infrared (mid-IR) silicon-based photonics [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(12): 2302-2312.
- [14] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 495-497.
- [15] Mashanovich G Z, Milošević M M, Nedeljkovic M,

[1] Haldar S K. Photogeology, remote sensing and geographic information system in mineral exploration

- et al. Low loss silicon waveguides for the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7112-7119.
- [16] Steinmeyer G, Skibina J S. Entering the mid-infrared[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 814-815.
- [17] Zou Y, Chakravarty S, Chung C J, et al. Mid-infrared silicon photonic waveguides and devices[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 254-276.
- [18] Hu T, Dong B W, Luo X S, et al. Silicon photonic platforms for mid-infrared applications[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 417-430.
- [19] Cheng Z Z, Qin C Y, Wang F Q, et al. Progress on mid-IR graphene photonics and biochemical applications[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2016, 9(2): 259-269.
- [20] Cheng Z Z, Chen X, Wong C Y, et al. Mid-infrared suspended membrane waveguide and ring resonator on silicon-on-insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(5): 1510-1519.
- [21] Marris-Morini D, Vakarin V, Ramirez J M, et al. Germanium-based integrated photonics from near- to mid-infrared applications[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(11): 1781-1793.
- [22] Liu T G, Chen W C, Cheng Z Z. Mid-infrared germanium photonics[M]//Mid-infrared germanium photonics. Bellingham: SPIE, 2020.
- [23] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
- [24] Gan X T, Shiue R J, Gao Y D, et al. Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 883-887.
- [25] Pospischil A, Humer M, Furchi M M, et al. CMOS-compatible graphene photodetector covering all optical communication bands[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 892-896.
- [26] Wang X M, Cheng Z Z, Xu K, et al. High-responsivity graphene/silicon-heterostructure waveguide photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 888-891.
- [27] Yue G, Xing Z, Hu H, et al. Graphene-based dual-mode modulators[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18456-18471.
- [28] Phatak A, Cheng Z, Qin C, et al. Design of electro-optic modulators based on graphene-on-silicon slot waveguides[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2501-2504.
- [29] Wang J, Cheng Z, Chen Z, et al. High-responsivity graphene-on-silicon slot waveguide photodetectors[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(27): 13206-13211.
- [30] Wang J Q, Cheng Z Z, Chen Z F, et al. Graphene photodetector integrated on silicon nitride waveguide[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(14): 144504.
- [31] Lei W, Antoszewski J, Faraone L. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4): 041303.
- [32] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. Quantum well infrared photodetector technology and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 154-165.
- [33] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, 68: 100228.
- [34] Cheng Z Z, Tsang H K, Wang X M, et al. In-plane optical absorption and free carrier absorption in graphene-on-silicon waveguides[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(1): 43-48.
- [35] Xing Z K, Li C, Han Y D, et al. Design of on-chip polarizers based on graphene-on-silicon nanowires[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(7): 072001.
- [36] Xing Z K, Li C, Han Y D, et al. Waveguide-integrated graphene spatial mode filters for on-chip mode-division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19188-19195.
- [37] Wang J Q, Cheng Z Z, Shu C, et al. Optical absorption in graphene-on-silicon nitride microring resonators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1765-1767.
- [38] Hon N K, Soref R, Jalali B. The third-order nonlinear optical coefficients of Si, Ge, and  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  in the midwave and longwave infrared[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 011301.
- [39] Cheng Z Z, Tsang H K, Xu K, et al. Spectral hole burning in silicon waveguides with a graphene layer on top[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1930-1932.
- [40] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 432-439.
- [41] Werle P, Maurer K, Kormann R, et al. Spectroscopic gas analyzers based on indium-phosphide, antimonide and lead-salt diode-lasers[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2002, 58(11): 2361-2372.
- [42] Lancaster D G, Gross S, Eborndorf-Heidepriem H, et al. Efficient 2.9  $\mu\text{m}$  fluorozirconate glass



- waveguide chip laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2588-2591.
- [43] Soref R A, Emelett S J, Buchwald W R. Silicon waveguided components for the long-wave infrared region[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2006, 8(10): 840-848.
- [44] Yang P Y, Mashanovich G Z, Gomez-Morilla I, et al. Freestanding waveguides in silicon[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(24): 241109.
- [45] Mashanovich G Z, Milosevic M, Matavulj P, et al. Silicon photonic waveguides for different wavelength regions[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2008, 23(6): 064002.
- [46] Spott A, Liu Y, Baehr-Jones T, et al. Silicon waveguides and ring resonators at  $5.5 \mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(21): 213501.
- [47] Li F X, Jackson S D, Grillet C, et al. Low propagation loss silicon-on-sapphire waveguides for the mid-infrared[J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15212-15220.
- [48] Cheng Z Z, Chen X, Wong C Y, et al. Mid-infrared grating couplers for silicon-on-sapphire waveguides [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(1): 104-113.
- [49] Lin H T, Luo Z Q, Gu T, et al. Mid-infrared integrated photonics on silicon: a perspective [J]. *Nanophotonics*, 2017, 7(2): 393-420.
- [50] Zhang L, Agarwal A M, Kimerling L C, et al. Nonlinear Group IV photonics based on silicon and germanium: from near-infrared to mid-infrared [J]. *Nanophotonics*, 2014, 3(4/5): 247-268.
- [51] Chang Y C, Paeder V, Hvozdar L, et al. Low-loss germanium strip waveguides on silicon for the mid-infrared[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2883-2885.
- [52] Younis U, Vanga S K, Lim A E J, et al. Germanium-on-SOI waveguides for mid-infrared wavelengths [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11987-11993.
- [53] Li W, Anantha P, Bao S Y, et al. Germanium-on-silicon nitride waveguides for mid-infrared integrated photonics [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(24): 241101.
- [54] Kang J, Takenaka M, Takagi S. Novel Ge waveguide platform on Ge-on-insulator wafer for mid-infrared photonic integrated circuits [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11855-11864.
- [55] Malik A, Dwivedi S, van Landschoot L, et al. Ge-on-Si and Ge-on-SOI thermo-optic phase shifters for the mid-infrared [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28479-28488.
- [56] Kang J, Cheng Z Z, Zhou W, et al. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane germanium waveguides [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2094-2097.
- [57] Nedeljkovic M, Penadés J S, Mitchell C J, et al. Surface-grating-coupled low-loss Ge-on-Si rib waveguides and multimode interferometers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(10): 1040-1043.
- [58] Younis U, Lim A E J, Lo P G Q, et al. Propagation loss improvement in Ge-on-SOI mid-infrared waveguides using rapid thermal annealing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2447-2450.
- [59] Nedeljkovic M, Penades J S, Mittal V, et al. Germanium-on-silicon waveguides operating at mid-infrared wavelengths up to  $8.5 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27431-27441.
- [60] Gallacher K, Millar R W, Griškevičiūtė U, et al. Low loss Ge-on-Si waveguides operating in the 8-14  $\mu\text{m}$  atmospheric transmission window [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25667-25675.
- [61] Osman A, Nedeljkovic M, Soler Penades J, et al. Suspended low-loss germanium waveguides for the longwave-infrared [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5997-6000.
- [62] Malik A, Muneeb M, Pathak S, et al. Germanium-on-silicon mid-infrared arrayed waveguide grating multiplexers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(18): 1805-1808.
- [63] Kozak D A, Stievater T H, Mahon R, et al. Germanium-on-silicon waveguides at wavelengths from 6.85 to 11.25 microns [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(6): 1-4.
- [64] Tian M, Qu M N, Wu L Y, et al. Progress on asymmetrical grating couplers for vertical coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500004.  
田苗, 瞿敏妮, 乌李瑛, 等. 用于垂直耦合的非对称光栅耦合器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500004.
- [65] Alonso-Ramos C, Nedeljkovic M, Benedikovic D, et al. Germanium-on-silicon mid-infrared grating couplers with low-reflectivity inverse taper excitation [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4324-4327.
- [66] Radosavljevic S, Kuyken B, Roelkens G. Efficient  $5.2 \mu\text{m}$  wavelength fiber-to-chip grating couplers for the Ge-on-Si and Ge-on-SOI mid-infrared waveguide platform [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19034-19042.
- [67] Kang J, Takagi S, Takenaka M. Design and

- characterization of Ge passive waveguide components on Ge-on-insulator wafer for mid-infrared photonics [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57 (4): 042202.
- [68] Manipatruni S, Preston K, Chen L, et al. Ultra-low voltage, ultra-small mode volume silicon microring modulator [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (17): 18235-18242.
- [69] Shen B, Chang L, Liu J, et al. Integrated turnkey soliton microcombs [J]. *Nature*, 2020, 582 (7812): 365-369.
- [70] Nedeljkovic M, Littlejohns C G, Khokhar A Z, et al. Silicon-on-insulator free-carrier injection modulators for the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2019, 44 (4): 915-918.
- [71] Griffith A G, Lau R K W, Cardenas J, et al. Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6299.
- [72] Yu M J, Okawachi Y, Griffith A G, et al. Silicon-chip-based mid-infrared dual-comb spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1869.
- [73] Troia B, Penades J S, Khokhar A Z, et al. Germanium-on-silicon Vernier-effect photonic microcavities for the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 610-613.
- [74] Radosavljevic S, Beneitez N T, Katumba A, et al. Mid-infrared Vernier racetrack resonator tunable filter implemented on a germanium on SOI waveguide platform [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8 (4): 824-835.
- [75] Xiao T H, Zhao Z, Zhou W, et al. Mid-infrared high-Q germanium microring resonator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2885-2888.
- [76] Michler P, Kiraz A, Becher C, et al. A quantum dot single-photon turnstile device [J]. *Science*, 2000, 290 (5500): 2282-2285.
- [77] Painter O, Lee R K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser [J]. *Science*, 1999, 284(5421): 1819-1821.
- [78] Takahashi Y, Inui Y, Chihara M, et al. A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold [J]. *Nature*, 2013, 498(7455): 470-474.
- [79] Ngo T P, El Kurdi M, Checoury X, et al. Two-dimensional photonic crystals with germanium on insulator obtained by a condensation method [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(24): 241112.
- [80] Kuroki M, Kako S, Ishida S, et al. Germanium photonic crystal nanobeam cavity with  $Q > 1, 300$  [C]//CLEO: Science and Innovations 2015, May 10-15, 2015, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2015: SM3G.4.
- [81] Xiao T H, Zhao Z, Zhou W, et al. Mid-infrared germanium photonic crystal cavity [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2882-2885.
- [82] Xiao T H, Zhao Z Q, Zhou W, et al. High-Q germanium optical nanocavity [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(9): 925-928.
- [83] Malik A, Muneeb M, Shimura Y, et al. Germanium-on-silicon planar concave grating wavelength (de) multiplexers in the mid-infrared [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(16): 161119.
- [84] Gallacher K, Millar R W, Griškevičiūtė U, et al. Ultra-broadband mid-infrared Ge-on-Si waveguide polarization rotator [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(2): 026102.
- [85] Liu J F, Sun X C, Camacho-Aguilera R, et al. Ge-on-Si laser operating at room temperature [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 679-681.
- [86] Wirths S, Geiger R, von den Driesch N, et al. Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(2): 88-92.
- [87] Süess M J, Geiger R, Minamisawa R A, et al. Analysis of enhanced light emission from highly strained germanium microbridges [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(6): 466-472.
- [88] Sukhdeo D S, Nam D, Kang J H, et al. Direct bandgap germanium-on-silicon inferred from 5.7%  $\langle 100 \rangle$  uniaxial tensile strain [J]. *Photonics Research*, 2014, 2(3): A8-A13.
- [89] Gassenq A, Tardif S, Guilloy K, et al. Accurate strain measurements in highly strained Ge microbridges [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(24): 241902.
- [90] Ghrib A, El Kurdi M, Prost M, et al. All-around SiN stressor for high and homogeneous tensile strain in germanium microdisk cavities [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(3): 353-358.
- [91] Petykiewicz J, Nam D, Sukhdeo D S, et al. Direct bandgap light emission from strained germanium nanowires coupled with high-Q nanophotonic cavities [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(4): 2168-2173.
- [92] Bao S, Kim D, Onwukaeme C, et al. Low-threshold optically pumped lasing in highly strained germanium nanowires [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1845.
- [93] Millar R W, Gallacher K, Frigerio J, et al. Analysis of Ge micro-cavities with in-plane tensile strains above 2% [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (5): 4365-4374.
- [94] Armand Pilon F T, Lyasota A, Niquet Y M, et al. Lasing in strained germanium microbridges [J].

- Nature Communications, 2019, 10(1): 1-8.
- [95] Fujigaki T, Takagi S, Takenaka M. High-efficiency Ge thermo-optic phase shifter on Ge-on-insulator platform[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6451-6458.
- [96] Ho C P, Zhao Z Q, Li Q, et al. Mid-infrared tunable Vernier filter on a germanium-on-insulator photonic platform [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2779-2782.
- [97] Ho C P, Zhao Z Q, Li Q, et al. Tunable germanium-on-insulator band-stop optical filter using thermo-optic effect [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-7.
- [98] Li T T, Nedeljkovic M, Hattasan N, et al. Ge-on-Si modulators operating at mid-infrared wavelengths up to 8  $\mu\text{m}$ [J]. Photonics Research, 2019, 7(8): 828-836.
- [99] Shen L, Healy N, Mitchell C J, et al. Mid-infrared all-optical modulation in low-loss germanium-on-silicon waveguides [J]. Optics Letters, 2015, 40(2): 268-271.
- [100] Shen L, Healy N, Mitchell C J, et al. Two-photon absorption and all-optical modulation in germanium-on-silicon waveguides for the mid-infrared [J]. Optics Letters, 2015, 40(10): 2213-2216.
- [101] Petersen C R, Møller U, Kubat I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3  $\mu\text{m}$  molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 830-834.
- [102] Cheng Z Z, Goda K. Design of waveguide-integrated graphene devices for photonic gas sensing [J]. Nanotechnology, 2016, 27(50): 505206.
- [103] Li W, Anantha P, Lee K H, et al. Spiral waveguides on germanium-on-silicon nitride platform for mid-IR sensing applications[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-7.
- [104] Mittal V, Nedeljkovic M, Carpenter L G, et al. Waveguide absorption spectroscopy of bovine serum albumin in the mid-infrared fingerprint region [J]. ACS Sensors, 2019, 4(7): 1749-1753.
- [105] Mittal V, Devitt G, Nedeljkovic M, et al. Ge on Si waveguide mid-infrared absorption spectroscopy of proteins and their aggregates[J]. Biomedical Optics Express, 2020, 11(8): 4714-4722.
- [106] Seo D, Gregory J M, Feldman L C, et al. Multiphoton absorption in germanium using pulsed infrared free-electron laser radiation [J]. Physical Review B, 2011, 83(19): 195203.
- [107] Nedeljkovic M, Soref R, Mashanovich G Z. Predictions of free-carrier electroabsorption and electrorefraction in germanium[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-14.
- [108] Sohn B U, Monmeyran C, Kimerling L C, et al. Kerr nonlinearity and multi-photon absorption in germanium at mid-infrared wavelengths[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(9): 091902.
- [109] de Leonadis F, Troia B, Soref R A, et al. Germanium-on-silicon waveguide engineering for third harmonic generation in the mid-infrared [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5103-5113.
- [110] de Leonadis F, Troia B, Soref R A, et al. Investigation of mid-infrared second harmonic generation in strained germanium waveguides [J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11126-11144.
- [111] Wolff C, Soref R, Poulton C G, et al. Germanium as a material for stimulated Brillouin scattering in the mid-infrared [J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30735-30747.
- [112] de Leonadis F, Troia B, Soref R A, et al. Theoretical demonstration of Brillouin lasing effect in racetrack resonators based on germanium waveguides in the mid-infrared[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 416-419.
- [113] de Leonadis F, Troia B, Soref R A, et al. Investigation of germanium Raman lasers for the mid-infrared[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17237-17254.
- [114] Zhang B, Yang W Q, Hou J, et al. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from 1.9  $\mu\text{m}$  to 4.3  $\mu\text{m}$ [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 1102013.
- 刘健宁, 蒋军彪, 连天虹, 等. 谐振腔应力对全反射棱镜式激光陀螺输出光强分布特性影响 [J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102003.
- [115] Jia Z X, Yao C F, Li Z R, et al. Progress on novel high power mid-infrared fiber laser materials and supercontinuum laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508006.
- 贾志旭, 姚传飞, 李真睿, 等. 新型高功率中红外光纤激光材料与超连续谱激光研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508006.
- [116] de Leonadis F, Troia B, Soref R A, et al. Modelling of supercontinuum generation in the germanium-on-silicon waveguided platform [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(21): 4437-4444.
- [117] Yuan J H, Kang Z, Li F, et al. Mid-infrared octave-spanning supercontinuum and frequency comb generation in a suspended germanium-membrane ridge waveguide [J]. Journal of



- Lightwave Technology, 2017, 35(14): 2994-3002.
- [118] Torre A D, Sinobad M, Armand R, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in a low-loss germanium-on-silicon waveguide [J]. APL Photonics, 2021, 6(1): 016102.
- [119] Guo Y H, Wang J, Han Z H, et al. Power-efficient generation of two-octave mid-IR frequency combs in a germanium microresonator [J]. Nanophotonics, 2018, 7(8): 1461-1467.
- [120] Liang T K, Tsang H K. Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(15): 2745-2747.
- [121] Zhou W, Cheng Z Z, Chen X, et al. Subwavelength engineering in silicon photonic devices [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(3): 1-13.
- [122] Zhou W, Cheng Z Z, Zhu B Q, et al. Hyperuniform disordered network polarizers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 288-294.
- [123] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics [J]. Nature Photonics, 2018, 12(11): 659-670.
- [124] Cheng Z, Chen X, Wong C Y, et al. Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide [J]. Optics Letters, 2012, 37(7): 1217-1219.
- [125] Cheng Z, Chen X, Wong C Y, et al. Broadband focusing grating couplers for suspended-membrane waveguides [J]. Optics Letters, 2012, 37(24): 5181-5183.
- [126] Fang Y R, Ge Y Q, Wang C, et al. Mid-infrared photonics using 2D materials: status and challenges [J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(1): 1900098.
- [127] Yang R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells [J]. Superlattices and Microstructures, 1995, 17(1): 77-83.
- [128] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser [J]. Science, 1994, 264(5158): 553-556.
- [129] Han S M, Chen W C, Hu H F, et al. Characterization method of a mid-infrared graphene-on-silicon microring with a monochromatic laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(6): 1683-1688.
- [130] Kasper E, Kittler M, Oehme M, et al. Germanium tin: silicon photonics toward the mid-infrared [J]. Photonics Research, 2013, 1(2): 69-76.

## Advances on Mid-Infrared Germanium Integrated Photonics

Guo Rongxiang<sup>1,2</sup>, Gao Haoran<sup>1,2</sup>, Cheng Zhenzhou<sup>1,2\*</sup>, Liu Tiegeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China

### Abstract

**Significance** Mid-infrared (2–20  $\mu\text{m}$  wavelength) photonics has extensive applications in spectroscopic analysis, environmental monitoring, medical diagnosis, free-space optical communication, and ranging, due to the distinguishable fundamental vibrational transitions of molecules and the atmospheric transmission windows (e. g. 2–2.5  $\mu\text{m}$ , 3–5  $\mu\text{m}$ , and 8–13  $\mu\text{m}$  wavelengths) in the mid-infrared spectral region. Previously, mid-infrared applications have been mainly developed based on benchtop free-space optical instruments (e. g. Fourier-transform infrared spectrometers), which inevitably suffer from expensive, heavy, and bulky setups. To overcome this limitation, mid-infrared integrated optics has been proposed and quickly developed in the past few decades. By using the nanofabrication technology, on-chip mid-infrared devices not only significantly reduce footprints, weights, and costs of mid-infrared photonic systems, but also open an avenue to explore the light-matter interaction at the nanoscale level.

Nowadays, numerous optical materials have been investigated to develop mid-infrared integrated optics, namely, noble metals, low-dimensional semiconductors, chalcogenide glasses, and group-IV semiconductors. As for noble metals and low-dimensional semiconductors, high optical losses of the developed waveguides hinder the potential large-scale integration of on-chip systems. While chalcogenide-glass-waveguides have attracted a great attention in many mid-infrared applications due to their ultra-low optical losses. However, the fabrication of the chalcogenide-glass-waveguides is not fully compatible with the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) technology. On the other hand, photonic devices based on group-IV semiconductors, namely, silicon, germanium,

tin, have the notable advantages of low optical loss, excellent physiochemical stability, and full CMOS compatibility, which are critical for practical applications with low-cost and high-volume production requirements. Consequently, mid-infrared group-IV photonics has been a hot topic in the past few years.

As for the most commonly used group-IV semiconductors, silicon is first used to explore mid-infrared photonic integrated circuits. As early as 2006, Soref et al. published a paper to discuss the prospects of mid-infrared silicon photonics. Compared with the near-infrared band, silicon dioxide has huge optical absorption to the mid-infrared light, thus the silicon photonic devices utilized for the near-infrared band cannot be directly used in the mid-infrared band. Numerous novel silicon waveguide configurations, namely, suspended membrane waveguides, subwavelength-cladding waveguides, and silicon-on-sapphire waveguides, have been demonstrated. However, due to the strong multi-phonon absorption of silicon, the low-optical-loss spectral region of silicon photonic devices can only reach the functional group region (wavelengths below  $8.0 \mu\text{m}$ ). For silicon-germanium alloys, the photonic devices can be operated up to at least  $8.5 \mu\text{m}$  wavelength. In contrast, for undoped crystal germanium material, optical absorption can be as low as  $1 \text{ dB/cm}$  within a spectral range from  $1.9 \mu\text{m}$  to  $16.7 \mu\text{m}$  at room temperature. Therefore, it is extremely promising to develop mid-infrared waveguides for long wavelengths based on a germanium platform.

**Progress** Germanium possesses advantages of wide transparency window ( $2\text{--}14 \mu\text{m}$  wavelength), high refractive index ( $\sim 4.0$ ), an excellent thermal optic coefficient ( $> 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ), large third-order nonlinear susceptibility ( $\sim 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ ), and low cost for high-quality and high-density device fabrication. Therefore, germanium devices could be an excellent candidate to develop mid-infrared applications, especially in the fingerprint region. Since the first germanium waveguide was developed in 2012, mid-infrared germanium photonics has been attracting increasing research attention. Currently, germanium waveguides are mainly demonstrated based on four types of integration platforms, namely, germanium-on-silicon wafer, germanium-on-silicon-on-insulator wafer, germanium-on-insulator wafer, and germanium-on-silicon nitride wafer. Based on the above germanium platforms, researchers have not only developed state-of-the-art passive optical components on a chip, such as low optical loss waveguides, grating couplers, high quality-factor microring resonators, and photonic crystal nanocavities, but also demonstrated mid-infrared waveguide-integrated lasers and electro-optical modulators. Moreover, to extend the spectral range of on-chip sensing applications to the fingerprint region, researchers have developed diverse chip-integrated gas and protein sensors by using the germanium waveguide devices. Besides, nonlinear optical phenomena, namely Kerr frequency combs and supercontinuum generation, have also been theoretically explored in the germanium devices to overcome the spectral bandwidth limitation of mid-infrared on-chip lasers.

**Conclusion and Prospect** In this paper, we briefly review the historical progress of mid-infrared group-IV photonics, and comprehensively summarize the development of recently emerging germanium photonics integrated circuits and their applications. In addition, the prospect of mid-infrared integrated optics is discussed. We hope this paper can not only serve as a reference for researchers specialized in mid-infrared photonics, silicon photonics, germanium photonics, optoelectronic materials, optical sensing, and spectroscopy, but also arouse attentions of researchers to mid-infrared integrated optoelectronics.

**Key words** integrated optics; integrated optics devices; infrared photonics; nonlinear optics; mid-infrared integrated photonics; germanium

**OCIS codes** 130.3120; 130.3060; 250.4390