



面向中红外应用的硅基光电子学最近研究进展

舒浩文, 苏昭棠, 王兴军, 周治平

(北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家实验室 北京 100871)

摘要:随着信息传递、处理以及存储能力要求的不断提升,传统的近红外通信波段已呈“容量紧缩”之势。而工艺与 CMOS 兼容、结构简单、成本低廉的硅基光电子学在中红外信号传输和处理方面已经显示出独特优势,有望在中红外波段实现大规模集成,在非线性光学等领域实现新的飞跃。首先介绍了硅基光电子学在中红外应用中的优势以及目前研究过程中所遇到的困难和挑战;其次结合材料属性和结构特性对一些基本元件(如波导、分束/合束器、二极管)等在中红外领域的最新研究成果进行了介绍;最后对近 5 年来在中红外波段所实现传感应用的非线性光学硅基器件(基于 FWM 的非线性光学器件、频率梳)和面向中红外通信应用的激光器、调制器、光电探测器进行了成果介绍,并对研究进展进行了总结。

关键词:硅基光电子学;中红外光谱;非线性光学;传感;光通信

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015274

Recent Progress of Silicon Photonics for Middle-Infrared Application

Shu Haowen, Su Zhaotang, Wang Xingjun, Zhou Zhiping

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communications System and Networks,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: “Capacity Crunch” in NIR field needs to be forestalled since the pressure of information transmission, processing and storage is continually growing. Silicon photonics, with compatibility of CMOS, compact structure and low fabrication cost, shows its superiority in the field of mid-IR transmission and signal processing. Thus a lead forward is expected to be realized in large-scale integration of mid-IR devices and nonlinear optical and other field. The strengths and challenge of silicon photonics in mid-IR application were estimated firstly. Then some “building block” components of silicon photonics in mid-IR (waveguides, beam splitter/combiner, diode, etc) were introduced. Achievements of devices (nonlinear optical devices based on FWM, frequency comb in sensing field and laser, modulator, detector in communication field) within the last five years were presented. Finally, the conclusion was made for recent research progress.

Key words: silicon photonics, mid-infrared spectroscopy, nonlinear optical, sensing, optical communication

收稿日期:2015-09-01;修回日期:2015-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61377056, No.61320106001), 教育部新世纪优秀人才计划基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61377056, No. 61320106001), Program for New Century Excellent Talents in University

论文引用格式:舒浩文, 苏昭棠, 王兴军等. 面向中红外应用的硅基光电子学最近研究进展. 电信科学, 2015274

Shu H W, Su Z T, Wang X J, *et al.* Recent progress of silicon photonics for middle-infrared application. Telecommunications Science, 2015274



1 中红外波段下硅基光电子学的优势和挑战

根据红外辐射在大气层中的传输特性,红外光谱通常分为近红外(NIR)、中红外(MIR)和远红外(FIR)。其中,中红外光谱(2~20 μm)由于谱带灵敏度高、基频振动强的特点,被广泛应用于环境监测、遥感技术等传感应用中。

硅基光电子学是一种可以用硅基集成电路上的设施、经验以及技术,设计、制造、封装光器件和光电集成电路,在集成度、可制造性和扩展性方面达到集成电路的水平,从而在成本、功耗、尺寸上取得突破的一种技术。在近红外波段,各个基于硅基光电子技术的通信器件都已经达到甚至超过了商用标准。

随着硅基光电子技术的不断发展,近年来,硅基光电子应用的波长范围逐渐从传统的通信波段延展至中红外和远红外波段。虽然目前集成硅基光电子器件的关注点着重在近红外数据通信应用中,但它在在中红外波段的应用潜力不容小视。简单来说,将硅和其他IV族材料作为中红外应用器件的基本材料有以下3点优势。

(1) 硅基器件中红外波段传输透明

硅材料在中红外波段存在低损耗透射窗口,因此关于低损耗中红外波段硅基波导实现的可能性成为近年来学术界热议的话题。随着大量实验工作的成功开展,这种可能性正逐渐走向现实。Baehr-Jones 小组^[1]在2010年实现了蓝宝石上硅波导4.5 μm 的TE单模传输。Milošević 等人^[2]在2009年对3.4 μm SOI波导的传输性能进行了大量的仿真。Soref 在参考文献[3]中报道了目前美国华盛顿大学和英国萨里大学的研究人员正在致力于Ge-strip-on-SOI异质结构的波导研究,其在中红外波段也展现出良好的低损耗传输特性。图1为硅基器件各种基本材料的传输光谱特性,其中白色框代表透明传输区域。

(2) 硅和其他族光电子材料在中红外波段具有很强的非线性效应

中红外波段的非线性效应是硅基光电子亟待研究的

应用领域。首先,相比于普通光纤,硅基微纳波导的克尔系数要高出200倍,而拉曼增益系数更是高达3 000倍。其次,泵浦激光源的研究已经十分成熟,可以利用近红外激光二极管泵浦二阶和三阶非线性光学器件。当选择波长在合适范围(硅材料大于2.1 μm ,锗材料大于3.0 μm)时,三阶非线性光学器件可以避免双光子吸收效应带来的负面影响;并且当IV族材料波导芯层的带隙变窄时,三阶电极化系数 $X^{(3)}_{\text{III}}$ 会有显著提升,其克尔效应也随之提升。最后,二阶非线性响应已经在许多有机聚合物和III-V/IV族复合材料中有良好应用。早在2007年UCLA(美国加利福尼亚大学洛杉矶分校)的Raghuathan 小组^[4]利用三阶拉曼非线性增益在硅中实现了3.39 μm 波段的拉曼放大,泵浦光源为2.88 μm ,其最大增益为12 dB,首次证明了中红外波段适合制作硅基光电子器件。2010年美国哥伦比亚大学和IBM研究所的研究人员^[5]应用硅材料在2 μm 附近较大的 $X^{(3)}_{\text{III}}$ 系数实现了由2.17 μm 泵浦的SOI单模波导的四波混频技术,从而设计出中红外波段的光学参量放大器和光学参量振荡器。同年Zlatanovic 小组^[6]利用四波混频技术得到的2 μm 纳米脉冲作为泵浦光,在硅基波导中实现了带宽为630 nm的中红外波长转换。目前锗材料的非线性应用还在研究中,它拥有硅材料4倍的三阶电极化系数 $X^{(3)}$ 。此外,一旦利用量子级联激光器实现大于3 μm 的高功率泵浦光源,将在3.5~5 μm 波段实现更高效的光参量放大器和光参量振荡器。

(3) 易于实现中红外应用器件片上集成

硅基光电子在中红外波段范围有许多潜在的应用,如工业/军事成像、光谱探测和传感、红外对抗、气体嗅探等,如图2所示。对于化学和生物传感应用,硅基光电子学充分发挥硅微电子先进成熟的工艺技术、高密度集成、价格低廉以及光子极高带宽、超快传输速率和高抗干扰性的优势,使得片上集成传感系统可以成为现实。可以预见,CMOS兼容的中红外非线性硅基器件将在不远的未来实现单芯片集成。利用硅平台制造非线性光电子器件可以实

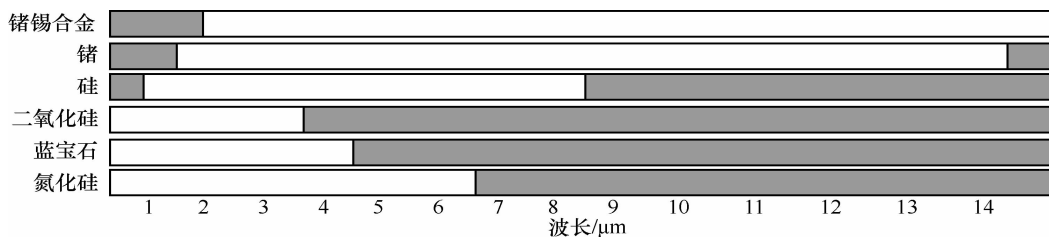


图1 硅基器件各种基本材料的传输光谱特性

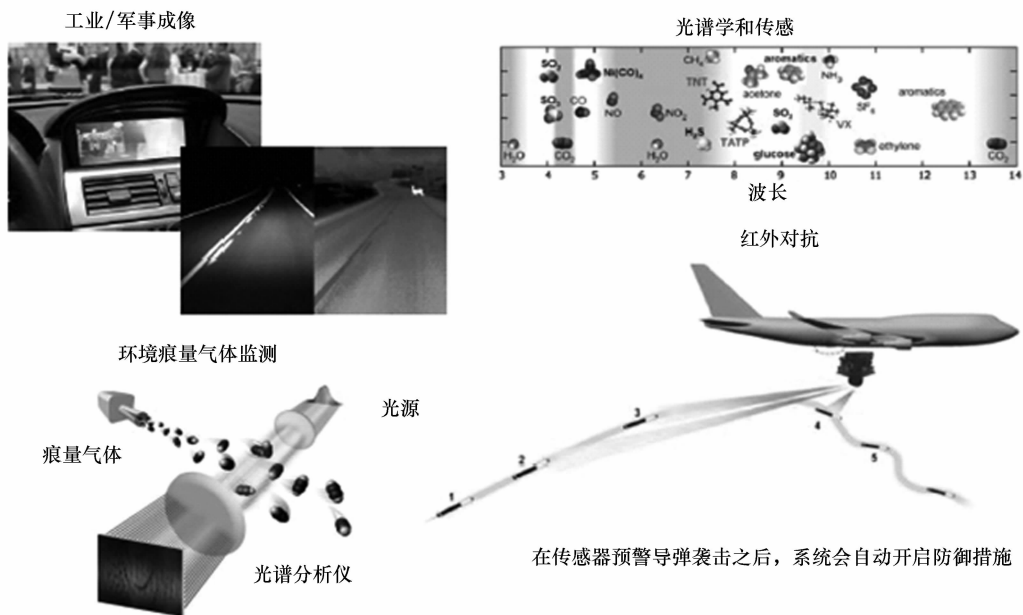


图 2 种类繁多的中红外应用

现一整套由片上激光泵浦、编码、调制、非线性信号处理、片上探测和分析等组成的集成系统。

虽然硅基光电子学在中红外窗口中的应用前景十分乐观,但其发展过程中存在的挑战也不容忽视。目前硅基光电子在中红外窗口首要的限制就是缺乏真正意义上的集成。目前大多数的集成系统都是基于分立元件的“组装”而不是一系列元件的无缝集成,芯片级的集成将给整个系统带来高性能、低成本、小尺寸等质的提升。其次,集成无源和有源器件的芯片是否能在室温下有良好的性能表现也是一个不小的挑战。集成系统中不同元件对工作温度的要求可能有所不同,当所有元件在同一室温下工作时,芯片的整体性能会受到相应的影响。为了使整体系统发挥出最高效率,局部制冷方案是不可或缺的,这也是目前光电子集成系统的一大难题。再者,单片集成的激光器和放大器在Ⅳ族材料为基础的光电子系统中依然是业界研究的难题。由于硅是间接带隙半导体材料,载流子直接跃迁复合的效率很低,因此很难实现高效率的发光器件。目前的设想是采用发光效率较高的Ⅲ-Ⅴ族半导体材料(主要是GaAs、InP、GaN)与硅基微纳波导(主要是GeSn/SiGeSn多量子阱二极管和SiGeSn/GeSn/SiGeSn双异质结构)通过倏逝波耦合的方式实现混合单片集成。此外,量子级联激光器也为4~5 μm波段激光的产生提供了解决办法。

以上对硅基光电子器件在中红外波段的应用优势和前景进行了分析,对其挑战和不足之处进行了总结。下面

将结合具体的基本结构和器件对硅基光电子学的中红外应用进行介绍。

2 中红外硅基波导

波导是硅基光电子学中一个基本的无源器件,是光信号的传输通道。通常,尺寸大小和传输损耗是评估一种特定波导的性能指标。传输损耗可以分成2个部分,即固有损耗(如载流子吸收)和外在损耗(如侧壁散射和辐射到基底的损耗)。前者在基于掺杂的波导中为主要损耗,当波导尺寸相当小(如SOI波导)时,由于硅表面场强和界面粗糙,后者将起主要作用。在中红外波段,波导主要有绝缘体上硅(SOI)、蓝宝石上硅(SOS)、氮化硅上硅(SON)和SOI体上锗(Ge/SOI)几种类型。它们的低损耗传输波长阈值分别为SOI, 3.7 μm; SOS, 4.4 μm; SON, 6.7 μm; Ge/SOI, 14.7 μm。其中,SOI波导在1.1~2.5 μm和2.9~3.6 μm范围拥有低于2 dB/cm的低传输损耗,在2.5~2.9 μm波段损耗十分突出。

近年来,研究人员主要通过改进材料和结构来降低波导的损耗问题,下面将从这两个方面介绍在中红外波段的发展现状。

2.1 传统 SOI 波导及其结构改进

2.1.1 SOI 条波导和 SOI 脊波导

在传统的近红外通信应用中,SOI结构一直被用于光电子器件的制造。对于SOI的常规波导结构,由于埋氧层(buried oxide cladding)的吸收损耗,限制了其在中红外波



段的应用,然而对于在埋氧层吸收较低的 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 中红外波段,埋氧层对波导传输损耗的影响在可接受的范围内。2012年英国萨里大学的 Milošević 小组^[6]实验测试了 SOI 条波导在 $3.74\ \mu\text{m}$ 波长下的传输性能,实验证实尺寸为 $1\ 400\ \text{nm}\times 500\ \text{nm}$ 的 SOI 条波导传输损耗为 $4.6\pm 1.1\ \text{dB/cm}$ 。同时该小组对 SOI 脊波导也进行了 $3.39\ \mu\text{m}$ 、 $3.73\ \mu\text{m}$ 和 $3.80\ \mu\text{m}$ 波长下的损耗测试,结果如图 3 所示。在 3 个波长的损耗分别为: $3.39\ \mu\text{m}$, $0.6\pm 0.2\ \text{dB/cm}(\text{TE})$ 、 $0.7\pm 0.2\ \text{dB/cm}(\text{TE})$; $3.73\ \mu\text{m}$, $1.8\pm 0.2\ \text{dB/cm}(\text{TE})$; $3.80\ \mu\text{m}$, $1.5\pm 0.2\ \text{dB/cm}(\text{TE})$ 。结果证

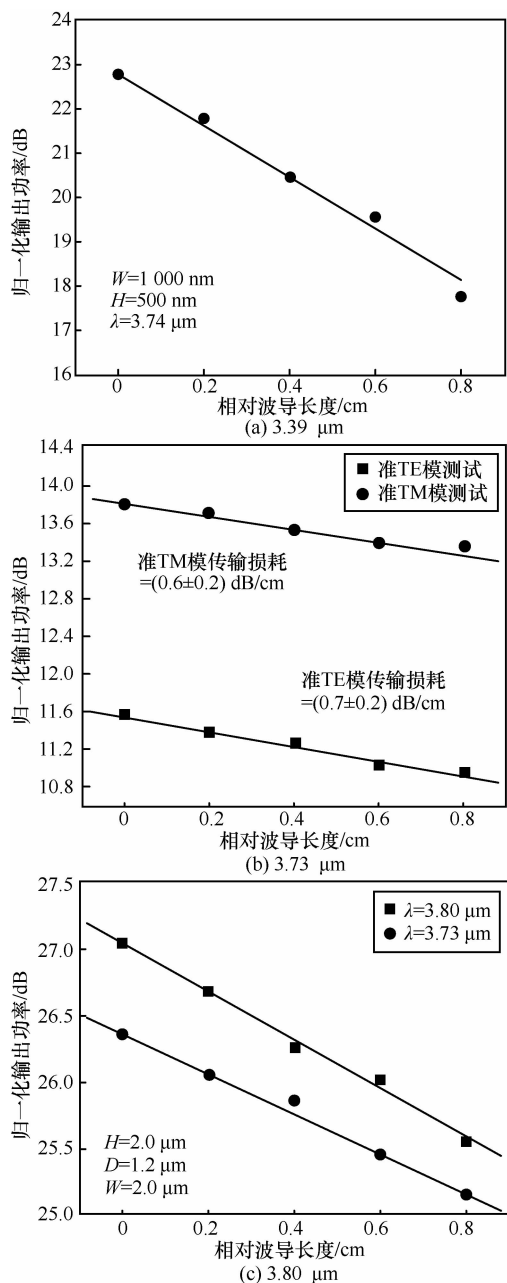


图3 SOI脊波导在 $3.39\ \mu\text{m}$ 、 $3.73\ \mu\text{m}$ 、 $3.80\ \mu\text{m}$ 下的传输损耗曲线

明,SOI 波导在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段埋氧层的损耗在合理范围内,依然是此波段硅基光电子器件的首选。

2.1.2 SOI 槽状波导

相比传统的 SOI 波导结构,槽状波导(slot waveguide)结构可以在波导间隙区域对电场进行放大(最高 20 倍),这恰好满足中红外硅基光电子传感器的高敏感性要求。2013 年,英国南安普顿大学的 Reed 小组^[7]首次实现了中红外波段下的硅基槽状波导。器件生长平台采用 6 英寸的 SOI 晶片,工艺上采用电子束曝光和 ICP 刻蚀。槽宽、槽—脊转换间隙和波导长度均为变量,图 4 为其 SEM 照片。波导和末端的耦合光栅刻蚀深度均为 $220\ \text{nm}$,因此整个工艺流程中只有一步刻蚀。当槽宽度为 $130\ \text{nm}$ 时,脊波导和槽状波导转换区域的损耗为 $0.06\ \text{dB/面}$ 。实验中 $1.42\ \mu\text{m}$ 的槽状波导损耗在 $9\sim 10\ \text{dB}$ 。同时,增加波导宽度和侧壁加工平滑度可以进一步优化改器件性能。

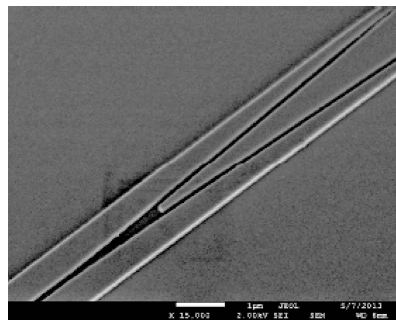


图4 SOI 槽状波导接口处 SEM 成像

2.1.3 SOI 悬浮波导

为了延展 SOI 波导的应用范围,研究人员采用氢氟酸溶液腐蚀掉波导正下方的埋氧层,消除了埋氧层的影响,使得 SOI 材料低损耗工作波长覆盖到中红外和远红外波段,这种新型的波导结构为 SOI 悬浮波导(suspended waveguide)。2012 年 Cheng^[8]设计了一种脊高为 $340\ \text{nm}$ 的悬浮波导,其制作过程为:首先在 SOI 片表面光刻、刻蚀脊波导;然后在脊波导两侧开小孔并刻蚀到埋氧层;最后将片子浸泡在氢氟酸溶液中,通过波导两侧的小孔掏空脊波导正下方的埋氧层,实现悬浮脊波导结构。实验测试得到在 $2.75\ \mu\text{m}$ 波长下波导的损耗为 $3\ \text{dB/cm}$ 。同时 Reed 等人基于 COMSOL 和 FEM 仿真软件在理论上证明,此类 SOI 悬浮波导最大可将适用波长延展至 $7\ \mu\text{m}$ 。图 5 为 $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 波段的悬浮波导传输损耗的理论仿真(刻蚀深度 $150\ \text{nm}$,宽 $5\ \mu\text{m}$)。

2.2 异质结构波导

在 $2.6\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$ 以上的红外窗口,二氧化硅对

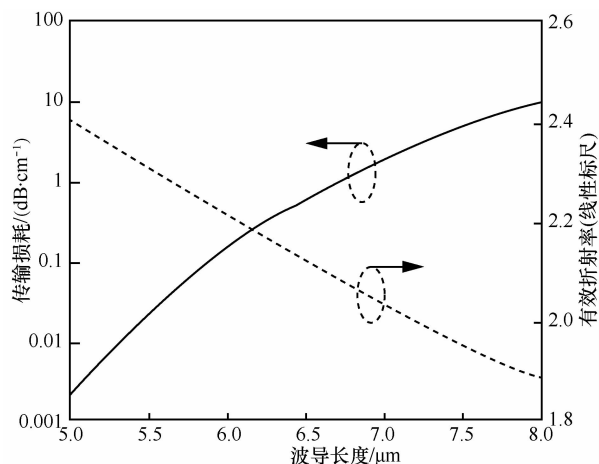


图5 悬浮波导有效折射率和传输损耗曲线

光的较大损耗限制了 SOI 波导在中红外波段的传输性能。通过替换波导包层的材料产生异质结结构可以使波导结构在中红外波段损耗降低。因此利用异质结结构制备中红外光波导是实现中红外低损耗光波导的有效办法。它利用了两种不同折射率材料间较大的折射率差将光场限制在低损耗的波导芯层,不但工艺比较简单、成熟,而且器件的设计思路和通信波段内的光波导设计思路类似,针对不同波长范围,可以选取不同的异质结结构。下面分别介绍 SOS、SiPSi 和 SON 3 种结构。

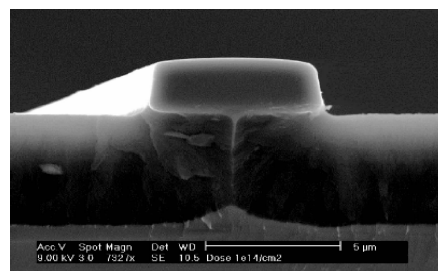
2.2.1 蓝宝石上硅波导

由于蓝宝石的低损耗传输窗口可到 $5.5\ \mu\text{m}$,近年来关于蓝宝石上硅(SOS)波导的报道层出不穷。SOS 波导分别在 $3.4\ \mu\text{m}$ 、 $4.4\ \mu\text{m}$ 、 $5.08\ \mu\text{m}$ 和 $5.5\ \mu\text{m}$ 实现了 $3.6\ \text{dB/cm}$ 、 $4.3\ \text{dB/cm}$ 、 $1.9\ \text{dB/cm}$ 和 $4\ \text{dB/cm}$ 的传输损耗^[10-13]。2010 年美国华盛顿大学的 Alexander Spott 小组^[13]首次在 $5.4\sim 5.6\ \mu\text{m}$ 波段利用 SOS 波导实现了 Q 值达到 3 000 的 $40\ \mu\text{m}$ 微环谐振器。2013 年,Shankar 小组^[14]报道了基于 SOS 波导在 $4.3\sim 4.6\ \mu\text{m}$ 波段 Q 值超过 150 000 的微环谐振器。为增加 Q 值减小波导损耗,研究人员采用了 98% 的硫酸和 30% 过氧化氢按体积比为 2.4:1 组成的混合酸液进行食人鱼刻蚀,氢氟酸循环并退火。然而 SOS 材料也有一些不足的地方:蓝宝石是一种很坚硬的材料,使得端面外耦合时 SOS 波导端面不能进行端面抛光,这导致端面不平整,大大降低了端面耦合效率;SOS 晶圆有更多的缺陷、更复杂的制作过程,价格上也更昂贵。

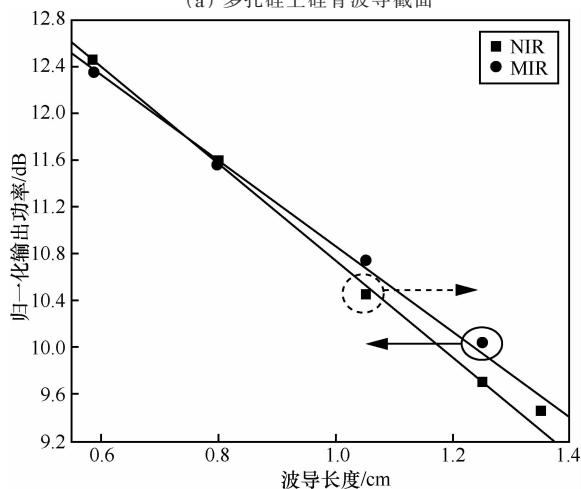
2.2.2 多孔硅上硅波导

采用多孔硅上硅(SiPSi)结构也可以扩大波导的应用波长范围。Mashanovich 等人^[15]最近报道了采用质子束曝光

制造多孔硅上硅结构的方法:首先,由 $250\ \text{keV}$ 的质子束以 $1\times 10^{14}\ \text{cm}^{-2}$ 的通量大小照射在硅片表面形成条波导区域;其次,把硅片放入氢氟酸溶液中进行电化学刻蚀,上表面形成的多孔硅用氢氧化钾去除掉;然后,再次将硅片放入氢氟酸溶液中进行电化学刻蚀形成衬底部分的多孔硅;最后,氧化、退火以减小波导表面的粗糙度。波导截面如图 6(a)所示,这样包层多晶硅的反射系数可以低至 1.4,对波导光传输有极大的限制作用。图 6(b)是尺寸为 $4\ \mu\text{m}\times 2\ \mu\text{m}$ 的 SiPSi 波导在近红外波段和中红外波段的损耗对比, $1.55\ \mu\text{m}$ 时损耗为 $2.1\pm 0.2\ \text{dB/cm}$, $3.39\ \mu\text{m}$ 时损耗为 $3.9\pm 0.2\ \text{dB/cm}$ 。



(a) 多孔硅上硅脊波导截面



(b) SiPSi 在 NIR 和 MIR 区域的传输损耗

图6 多孔硅上硅波导

2.2.3 氮化硅上硅波导

氮化硅上硅(SON)也是目前一种新型的异质结波导结构。它的制备方法如图 7 所示:切割同样大小的两块 SOI

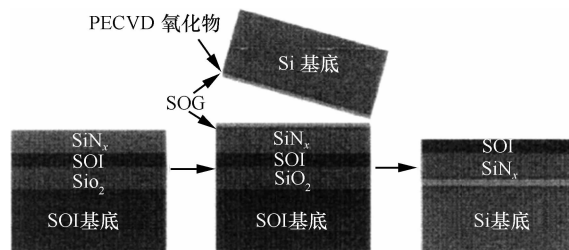


图7 SON 材料制备流程



片和硅片;利用化学气相沉积(PECVD)在 SOI 片表面沉积一层氮化硅;利用 PECVD 在两个片子表面沉积一层二氧化硅,增大 SOG 的附着;键合、去 SOI 片的下表面硅和埋氧层。

2013 年, Khan 小组^[16]报道了脊高为 2 μm 的 SON 波导,它在 3.39 μm 波长传输损耗为 5.2 dB/cm。由于氮化硅的低损耗透射窗口能达到 7 μm , 具有较低的反射系数(2 附近),且 SON 结构简单,使得它能够在中红外范围内实现硅基器件良好的带宽特性。

2.2.4 锗硅波导

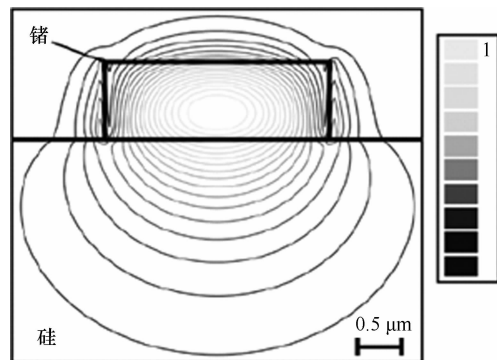
此外,锗硅也是一种前景良好的中红外波导材料。锗在中红外波段的吸收损耗比蓝宝石和硅都要低,且锗的反射系数很高,可以更紧密地束缚光场。理论上锗硅波导可以工作在 1.9~16.7 μm 超宽光谱范围。采用 SOS 波导类似的制备方法理论上可以制备出损耗较小的锗硅波导, Alexander Spott 等人^[17]对这种波导进行了光场分散仿真,如图 8(a)所示。

相比传输损耗而言,集成波导的色散和非线性特征更为可控。色散的光谱特征,比如零色散波长的位置和数量、色散斜率,都对非线性器件的带宽性能有重要影响。由于色散与材料的二阶非线性系数有关,故通过改变波导的形状和尺寸可以对波导色散加以控制。近来, Zhang Lin 等人^[18]提出了一种对集成高指数对比波导进行色散控制的技术。这种技术利用一种偏离中心的纳米级沟槽来控制波导器件在不同波长下的模式分布,得到十分平缓的色散变化分布,从而制造超宽带宽的非线性波导。图 8(b)为锗硅波导不同模式下的色散关系。

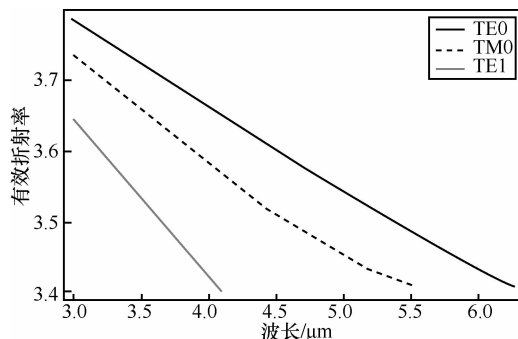
3 中红外光分束器/合束器

分束器/合束器是高速光调制和光多路复用技术中的重要组成器件。随着硅基光电子的应用窗口延展至中红外波段,分束器/合束器在该波长范围下的工作性能也逐渐受到关注。下面结合最近的一些研究成果介绍 3 种器件: MMI(多模干涉分束器)、MZI(马赫—曾德尔干涉仪)和 AMMI(多角度多模干涉多路复用器)。

MMI 使得输入光的两个正交的偏振模式的光分别从不同端口输出。由于硅材料具有大的双折射率差的特点,基于 SOI 平台的集成电路通常会存在偏振敏感的缺点,因此偏振分束/合束器也是硅基光电子学中研究的一个重点。2013 年, Nedeljkovic 等人^[19]设计了一种工作在 3.8 μm 波长的 MMI。通过精确控制器件的几何尺寸使得其性能表



(a) 光场分布



(b) 不同模式下的色散关系

图 8 硅锗波导特性

现良好。实验测得该器件使用 SOI 平台在 3.8 μm 下插入损耗仅为 0.1 ± 0.01 dB, 十分接近近红外波段下的 MMI 最小插入损耗。研究人员还采用多孔硅波导平台对相同器件进行了测试,损耗也比较理想(0.37 ± 0.08 dB)。

MZI 是硅基电光调制器和波长滤波器的重要组成部分。Nedeljkovic 等人^[20]设计的非等臂 MZI 结构短臂臂长为 928 nm,臂差为 350 μm 。该结构在 3.7~3.9 μm 波段传输损耗为 1.6~2.4 dB,最大消光比可达 34 dB,FSR 大约在 10 nm,如图 9 所示。从结果可以看出,MZI 器件在中红外领域的研究也已经趋于成熟。

AMMI 是中红外高速数据传输和传感器应用器件的基础。如图 10(a)所示,该器件的输入输出波导与轴向成一定

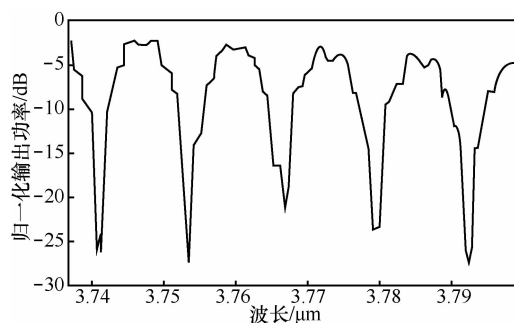


图 9 MZI 结构的静态光传输谱线

角度 θ 。而输入输出波导间的轴向距离计算式为 $L_i = \frac{4n_{\text{eff,AMMI}}}{\lambda_i} \times W_{\text{AMMI}}^2$ 。Nedeljkovic 等人^[7]设计的该器件能在 $3.8 \mu\text{m}$ 处实现 30 nm 相移的多路信号复用,实验测得器件有 $4 \sim 5 \text{ dB}$ 的插入损耗、 -12 dB 的通道间串扰损耗,如图 10(b)所示。其工作损耗比近红外下稍高。随着信号传输速度要求的不断提高,器件还要向通道数增加、串扰和插入损耗降低的方向优化。

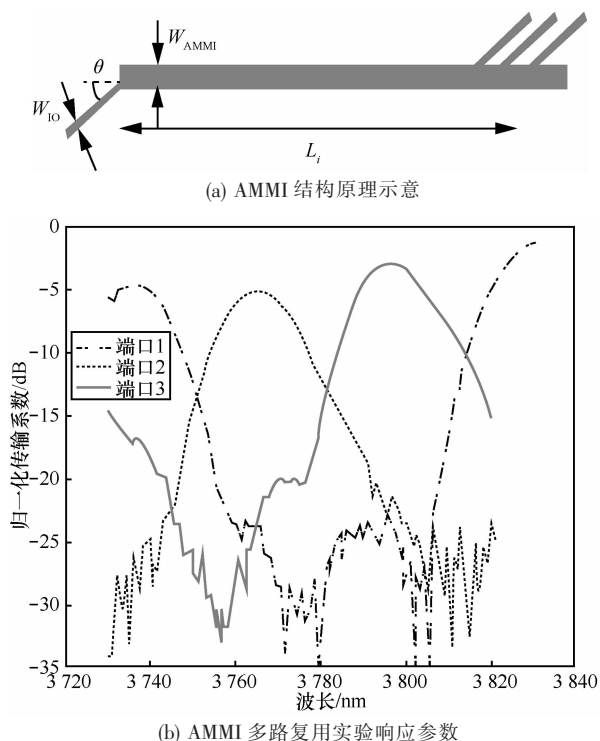


图 10 AMMI 结构与特性

4 中红外二极管

信号单向导通器件是集成光学中一种重要的基本元件。如何实现光信号的非互易导通,即二极管效应,是集成硅基光电子学研究的基本问题之一。在近红外波段,Fan 等人^[21]在 2012 年提出了利用硅基环型谐振腔来实现 CMOS

兼容的近红外全光二极管。这种方案采用的是双光子吸收(TPA)效应导致的热光现象来实现二极管单向导通,而硅材料的 TPA 效应范围十分有限($1.1 \sim 2.2 \mu\text{m}$),在中红外波段无法采用相同的方案实现二极管效应。同年,南开大学的研究小组^[22]提出了一种基于自相位调制效应的中红外硅基全光二极管设计方案。此方案采用 SOI 悬浮波导为基本材料,包含了两个硅基微环谐振腔和一根硅基直波导。由于自相位调制效应的作用,环型谐振腔的谐振波长发生改变,进而可以实现光信号的单向导通,经过优化,此种类型的光二极管的最大非互易导通率(NTR)大于 40 dB 。

该二极管器件结构如图 11 所示。由于自相位调制效应的作用,光场在环型谐振腔中的谐振波长会发生红移,故而左侧谐振腔被设计在 $P_{\text{in}}=0$ 时谐振波长等于信号光波长,而右侧谐振腔则被设计在 $P_{\text{in}}=P_{\text{signal}}$ 时谐振波长等于工作波长。当信号光从左侧入射时,将损失一部分能量而不会发生谐振,当到达右侧谐振腔时,输入信号小于 P_{signal} ,也不会发生谐振;当信号光从右侧入射时,由于 $P_{\text{in}}=P_{\text{signal}}$,信号光将在右侧环中发生谐振从而损失大部分能量,剩余的信号光到达左侧谐振腔时,由于 $P_{\text{in}} \approx 0$,又将发生谐振使剩余能量进一步损耗,这样就实现了信号的单向导通。

图 12 分别为在 2 mW 信号功率下,正向入射和反向入射时的透过谱。可以看到,当信号光正向传输时,左侧微环的谐振波长移到了 2533.57 nm ,对应信号光波长处的损耗为 2.75 dB ;而信号光进入右侧微环时,其谐振波长只移动到了 2533.544 nm ,对应信号光处的损耗为 1.2 dB ;当信号光反向传输时,右侧微环的谐振波长即信号光波长,信号光的损耗为 17 dB ,而在左侧微环中,工作波长仍处于谐振状态,信号光的损耗为 30 dB 。这样,信号光的正向传输损耗为 3.95 dB ,而反向传输损耗大于 45 dB ,很好地实现了单向导通。

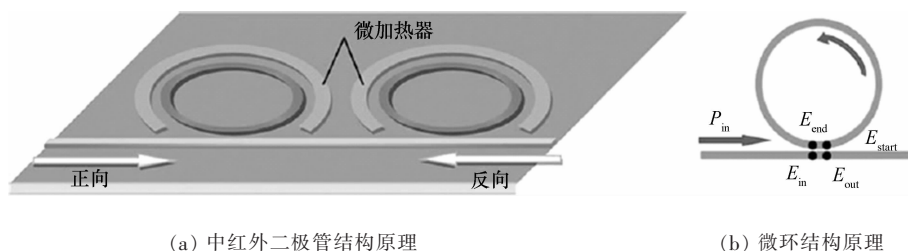
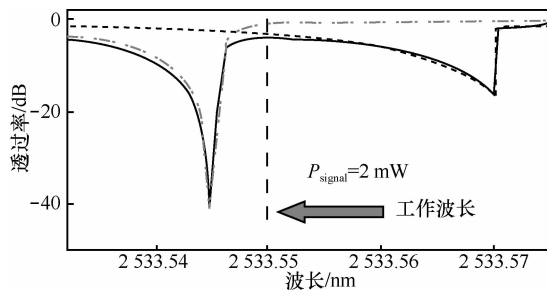
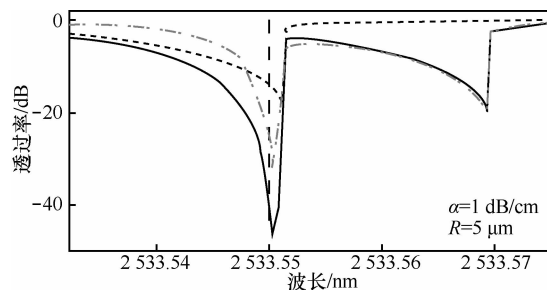


图 11 二极管器件结构



(a) 信号正向输入



(b) 信号反向输入

图 12 环型腔全光二极管透过谱

5 中红外激光源和放大器

就产生中红外激光方法而言,目前有线性光学产生的如半导体量子级联激光器、固体激光器、自由电子激光器、化学激光器、气体激光器;非线性方法产生光学倍频激光器、差频激光器和光参量激光器。本文主要介绍非线性激光器的研究进展。

由于光纤在 1 550 nm 左右拥有最低的传输损耗,目前光纤传输系统一般都工作在这个波长附近。但当系统中需要引入在高功率泵浦光下工作的非线性器件(如光参数放大器、波长转换器)时,双光子吸收效应(TPA)将对整个性能产生极大的限制^[23-25]。TPA 效应是指两个光子“合作”跨越能级带隙的过程。这个过程将产生一定数量的自由载流子,而硅是间接带隙材料,其载流子复合速率只有 10³~10⁶s,故而当泵浦光功率较高时,TPA 效应产生的自由载流子数量将迅速累积,而这些自由载流子对光场的吸收效应使得泵浦光的效率大大降低。而在中红外波段,由于产生 TPA 效应的阈值为 2.2 μm,自由载流子损耗将大大降低,故而在中红外波段是基于高功率泵浦光非线性光学器件的良好实现平台^[26-29]。基于硅基光电集成技术的中红外光源及其他非线性器件将在医学组织灼烧去除技术、碳氢化合物排放探测等中红外应用中具有良好的前景^[30]。下面将介绍最近几年红外激光源和放大器的研究情况。

5.1 基于 FWM 的中红外光学参量放大器

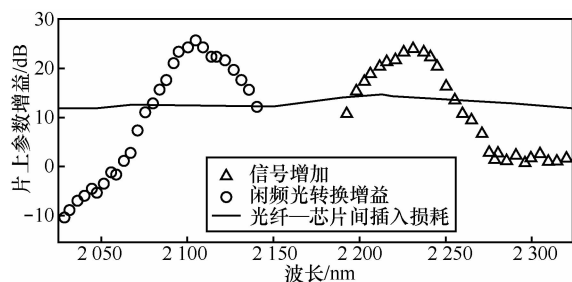
实现中红外参量放大有两种机制:受激斯托克斯拉曼散射(SSRS)和四波混频(FWM)技术。由于拉曼放大线宽约为 1 nm,故而难以实现宽带的参量放大^[4];而四波混频技术只要通过控制相位匹配和反常色散参数,就可以在很宽的光谱范围内实现光学参量放大。

硅基光电子在中红外波段取得的一个重大突破正是 2010 年 Green 等人和 Zlatanovic 等人^[31,32]分别独立提出的硅基光学参量放大器。两组研究人员均采用四波混频技术实现参量放大。Green 小组采用的泵浦光波长选在 TPA 效应阈值 2.2 μm 边缘,硅基波导长度为 4 mm,有效截面积仅为 0.3 μm²(700 nm × 425 nm)。实验测得该参量放大器的最高放大倍数为 25 dB,有效克服了光纤耦合损耗和波导传输损耗,可以实现高达 13 dB 的片上总增益,如图 13(a)所示。而 Zlatanovic 等人的器件波导长度为 3.8 mm,有效截面积为 0.35 μm²,与 Green 的器件尺寸近似于相同。而与 Green 泵浦光采用 2 200 nm 的中红外钛:蓝宝石光参数振荡器光源不同,Zlatanovic 等人采用的是结构精简的光纤激光器。将通信波段的 1 300 nm 和 1 589 nm 激光通过一个长度为 8 m 的高非线性系数光纤,产生了 1 758 nm 的信号光和 2 388 nm 的泵浦光,实现了光源的低成本和精简化。利用 FWM 技术,这类放大器最大转换效率为-36.8 dB。

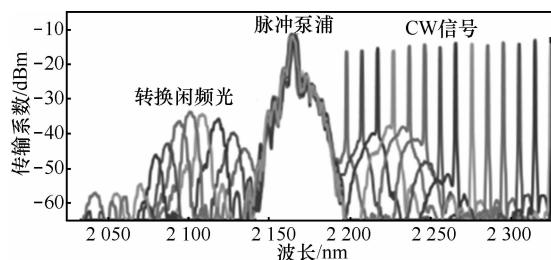
同年,Green 等人通过对之前研究结果进行优化的反常色散调控,利用截面为 900 nm × 220 nm、长度为 2 cm 的 SOI 波导,实现了带宽超过 550 nm、片上总增益大于 30 dB 的超宽带光学参量放大器。采用相同结构,改变泵浦激光波长和相位匹配截面,选择合适的泵浦光功率,该器件同样实现了 1 540~2 500 nm 的超连续宽谱光源;通过选择合适的泵浦波长(1 946 nm),该器件还能实现通信波段(1 620 nm)和中红外波段(2 440 nm)之间的波长变换,如图 13(b)所示。

5.2 基于硅基频率梳的中红外激光器

光学频率梳是指在一个波段范围内一系列相干光源组合,具有窄线宽、频率间隔小、光谱峰等距的特点。由于中红外波段存在大量的吸收峰,窄线宽的光学频率梳在气体分子探测中有着广泛的应用^[33]。因此利用硅基光电子技术 CMOS 兼容、器件结构精简、批量制造成本低的优势,有望实现气体嗅探和浓度测量的片上集成。近年来,中红外光学频率梳的实现平台有光纤激光器、锁模激光器和光学参量振荡器等几种^[34-36]。然而以上平台相对来说体积较大,集成困难。基于硅波导的超连续光谱具有带宽大、结构精



(a) 光参量放大器输出结果



(b) 中红外 FWM 实验结果

图 13 实验结果

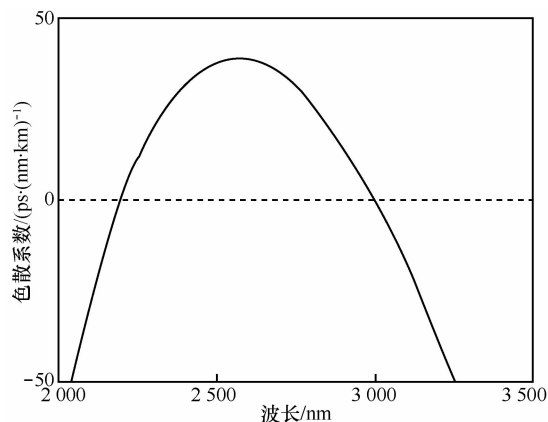
简、CMOS 兼容的特点,但产生这种光谱所需的泵浦光功率较高,且光谱峰间距约为 100 MHz,无法满足精密探测的需求。另一种方法是采用量子级联激光器^[37],而活性物质在实现片上集成上也存在一定困难。

而基于微环谐振腔的频率梳由于具有宽带、精简、易于片上集成等特点,具有良好的研究前景。基于谐振腔的频率梳利用四波混频中的非线性参量过程,使得泵浦激光的能量通过非线性相位调制效应转移到泵浦光附近的谐振腔所支持的波长,从而产生了一系列间距与谐振腔自由光谱范围相等的相干激光。

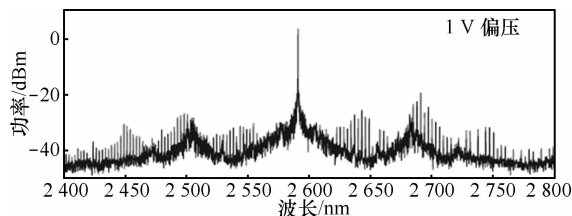
在中红外波段,实现硅基微环频率梳的难点主要有两点:一是线性损耗,主要来自于器件刻蚀后表面粗糙导致的散射;二是 2.2~3.3 μm 波段下的三光子吸收效应产生的自由载流子吸收效应^[38,39]。2015 年,美国康奈尔大

学的 Griffith 等人^[40]利用新型热氧化工艺和外加反向偏置电压的方法成功解决了上述损耗,基于微环谐振腔和外加 1.2 W 的 2.59 μm 泵浦光得到了 2.1~3.5 μm 范围的频率梳。其频率间隔为 127 ± 2 GHz。图 14 为微环结构和器件截面 SEM。

微环直径为 200 μm ,铝电极与离子掺杂区实现欧姆接触,工作时外加反向电压用以加快三光子吸收效应产生的自由载流子。工艺方面,与传统的干法刻蚀工艺不同,研究人员通过氮化硅作为掩膜的热氧化技术避免了器件表面不平滑带来的功率散射和吸收^[41-43],使得器件本征状态下品质因数达到 590 000,传输损耗为 0.7 dB/cm。为了实现器件的高带宽,通过对改变波导截面的几何形状调控色散,使得 FWM 效应能够发生在较宽的范围^[44,45]。图 15 为器件

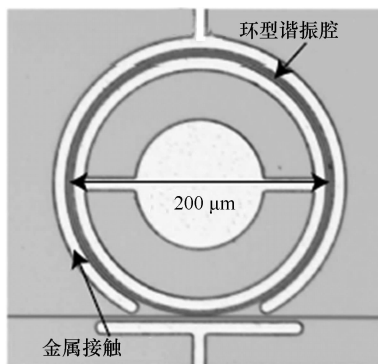


(a) MIR 微环色散系数曲线

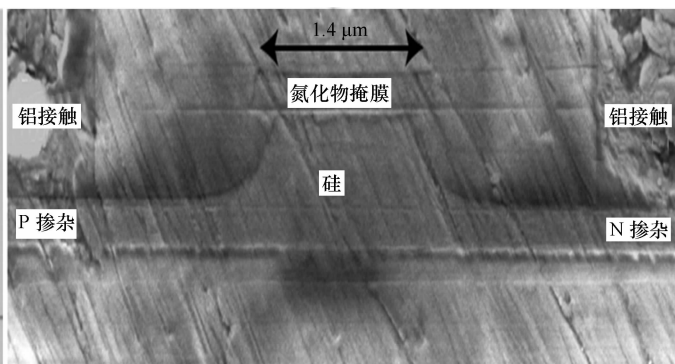


(b) 偏压下的频率梳效果谱线

图 15 MIR 微环特性



(a) 微环基本结构



(b) 微环截面 SEM 成像

图 14 中红外频率梳结构与特性



在 $2.2\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 的色散系数和外加 $1\ \text{V}$ 反向偏置时的频率梳输出结果。

5.3 量子级联激光器

不少研究人员将能产生宽谱激光的量子级联激光器列为中红外光源的重要选择。量子级联激光器是一种基于子带间电子跃迁的新型单极光源,将数个量子阱结构串联在一起。它的输出波长与有源区量子阱厚度有关,可通过温度或电流进行调谐。现已经研制出的量子级联激光器波长范围为 $3.4\sim 17\ \mu\text{m}$ 。到目前为止,中红外 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 量子级联激光器基本采用 GaInAs/AlInAs 材料。

6 中红外调制器和探测器

近年来,随着云计算和远程手术等新型应用概念的提出,全球基础通信数据量以每年 50% 的惊人速率飞速上升。陡峭增长的数据传输量对光通信提出了更高的要求。为了解决容量紧缩问题,中红外短波段($2\sim 3\ \mu\text{m}$)正逐渐进入科学家们的视野。研究人员在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 的短波波段的新型的光纤、放大器和非线性过程进行了比较成熟的研究。为了发挥硅基光电子的成本优势,适用于中红外短波段的光收发机元件需要重新进行设计。光电收发机系统中两个最重要的元件是高速光电探测器和高速光学调制器。下面将分别介绍这两种元件在中红外短波段的最新进展。

6.1 光电探测器

光电探测器是将入射光能量转化为电信号的光电子器件。它不像激光器那样必须是直接带隙的材料,因此硅基平台可以制备性能良好的探测器。在近红外通信波段,锗硅材料是目前最常用的实现高速探测的平台^[46]。但由于锗在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段传输透明性太强,近红外的锗硅探测器无法适用中红外短波波段。目前将探测器应用范围拓展至 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段的方法有3种:Ⅲ-V硅基混合材料探测器^[47]、

石墨烯硅基探测器^[48]、基于缺陷介导的硅基探测器^[49]。而基于缺陷介导吸收的硅基探测器在通信波段中就表现出良好的集成能力。它的主要机理是:在禁带内引入缺陷状态,通过光学吸收和缺陷状态引起的热激发机制实现光子的吸收。在近红外波段,研究人员已经实现了带宽超过 $30\ \text{GHz}$ 、响应率为 $1\ \text{A/W}$ 的缺陷介导吸收探测器。在 $2\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$ 波长下,响应率分别会下降 $3\ \text{dB}$ 和 $20\ \text{dB}$ 。造成响应度下降主要有两个原因:波导尺寸导致的光子和缺陷接触面积的降低,模场限制系数下降导致的基底吸收损耗和重掺杂离子吸收损耗。2014年,Thomson等人^[50]率先实现了 $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段下的缺陷介导探测器。该器件工作在 $10\ \text{Gbit/s}$ 速率、 $30\ \text{V}$ 反向偏压下,响应度约为 $0.1\ \text{A/W}$,器件制作采用的SOI脊波导尺寸为 $4.7\ \mu\text{m}\times 3.5\ \mu\text{m}$ 。影响器件的关键因素是离子掺杂浓度,需要在掺杂导致的载流子吸收效应和载流子复合速率之间找到最优化的参数组合。2015年,Ackert等人^[51]基于上述结构进行了优化,实现了带宽更宽、响应度更高、器件尺寸更小的缺陷介导探测器。其结构如图16所示。

器件在 $20\ \text{Gbit/s}$ 速率、 $27\ \text{V}$ 反向偏压下实现了 $0.3\ \text{A/W}$ 的响应度,暗电流小于 $1\ \mu\text{A}$ 。值得注意的是,它的截面积只有 $0.22\ \mu\text{m}^2$,相比Thomson之前工作中的 $10\ \mu\text{m}^2$ 要精简很多。 $20\ \text{Gbit/s}$ 的工作速率也是目前为止 $2\ \mu\text{m}$ 波长下最快的工作速率,如图17所示为眼图效果。

实现这类精简结构的探测器重要意义在于,实现了中红外波段探测器真正意义上的硅基集成,制作过程无需CMOS工艺外的其他工具。值得注意的是,由于温度敏感性对缺陷结构的影响^[52],缺陷的引入必须在整个工艺流程的后端。

6.2 调制器

6.2.1 基于等离子色散效应的中红外硅基调制器

基于自由载流子注入,耗尽和累积式等多种调制方式

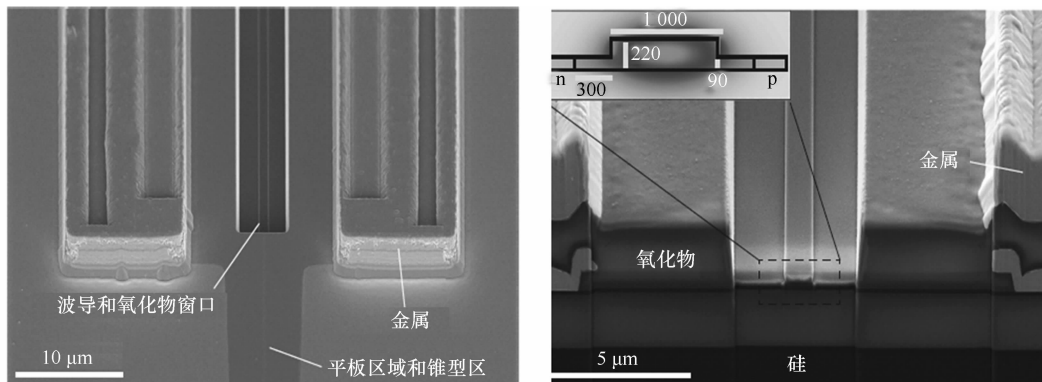


图16 缺陷介导探测器结构示意图

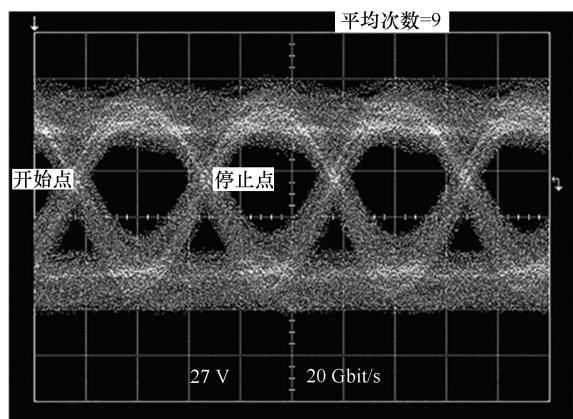


图 17 探测器 20 Gbit/s 眼图工作结果示意

的硅基等离子色散调制器目前已经拥有广泛的应用。等离子色散效应结合了 CMOS 兼容、性能可观、生产简易的特点,这使得它在调制器领域备受关注。通信波段下基于聚合物、锗、半导体材料和石墨烯等材料的高速调制器都已经成功实现。相比在 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段的广泛研究和应用,目前在中红外波段范围内,基于等离子色散效应的硅基调制器的研究工作十分有限。研究人员理论证实中红外波长下自由载流子浓度对硅材料反射系数的影响较通信波段来说要显著很多^[53]。2015 年英国南安普顿大学的 Thompson 等人利用载流子注入式可变光衰减器实验测试了近红外到中红外波段下 ($1.3\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$) 等离子色散效应对器件传输性能的影响^[50],并成功匹配了之前的理论值。实验器件主要组成部分是 p-i-n 结构二极管,本征区结构由波导构成。当器件上加载正向偏置时,自由载流子被注入本征区波导区域中,从而增加对传输光的吸收。通过测量输出光强度,得到了不同波长下归一化的传输损耗曲线如图 18 所示。

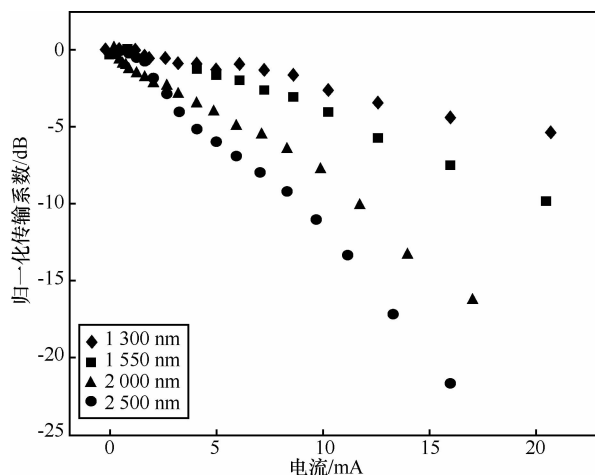


图 18 等离子色散效应不同波长下光吸收曲线

可以看出,随着波长的增加,由等离子色散效应造成的波导光传输损耗也越加明显。这预示着工作在 $2\ \mu\text{m}$ 窗口的等离子色散效应硅基调制器将拥有更加精简的结构和更低的驱动电压,器件的能耗也相比传统的通信波段大大降低。因此,在中红外窗口基于等离子色散效应的硅基调制器性能将随着波长的增加而提升。相比传统通信波段,此类调制器在中红外窗口的硅基集成和 CMOS 兼容方面将更加出色,可以预见此类调制器在中红外窗口的应用将解决传统通信波段日益紧张的传输容量限制问题。

6.2.2 基于双光子吸收效应的交叉吸收调制器

虽然非线性吸收在许多高功率的应用中是限制器件性能的缺陷项,但基于 TPA 效应的超快速特性,许多全光处理功能,例如脉冲整形、逻辑门、调制器和高速开关等得以实现^[54,55]。2015 年 Li 等人^[56]利用锗上硅在 $2\ \mu\text{m}$ 波长附近的高 β_{TPA} 参数提出了基于交叉吸收调制 (XAM) 的高速全光调制。由于锗的 TPA 效应产生范围相对于硅较宽^[57],其 β_{TPA} 参数也较高,所以在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 的中红外波段锗硅的硅光子器件可以通过双光子吸收效应实现高速率、高消光比的调制。这对未来自由空间通信系统向中红外波段的搬移以及超高速通信系统的搭建拥有极大的积极意义。

高强度的泵浦光子和另一加载在探针上的信号光子跨越能带在 TPA 效应的作用下被吸收,输出信号“0”;相反的,当信号为低或空时,光子能量无法跨越能带产生 TPA 效应,光子将通过器件,输出信号“1”。

XAM 调制实验的平台搭建和实验过程如图 19 所示。高功率激光源通过锁模激光器和掺铒光纤产生周期为 25 MHz,脉冲宽度为 5 ps 的 $1.95\ \mu\text{m}$ 激光。通过分束器进入高功率泵浦和低功率探针,输出通过一个合束器进行合束并通过一个 40 倍的物镜耦合进入光纤。输出光信号经由第二个 40 倍物镜收集进入硒化铅前置放大光敏探测器进行信号功率的测量。

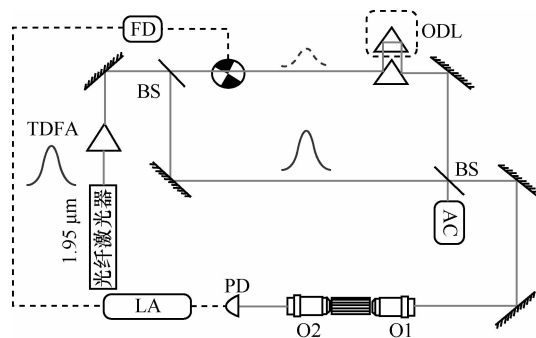


图 19 XAM 实验测试平台



通过控制探针的脉冲时延,泵浦功率为 10 W 时输出的平均功率仅为 4 mW,图 20 绘制了此时输出信号的强度示意。测量所得到的反应速率清楚地显示出 TPA 效应出现时,硅波导具有超快的光吸收速率。因此对 5 ps 的信号能够达到大约 200 GHz 甚至 THz 量级的速率,从而实现超高速率的调制。值得注意的是,由于自由载流子复合的时间较长,TPA 效应消失后依然存在自由载流子吸收效应,这使得光强较最大值有 10% 的衰减吸收。因此在这个调制系统中还需要添加快速消除自由载流子的方案。

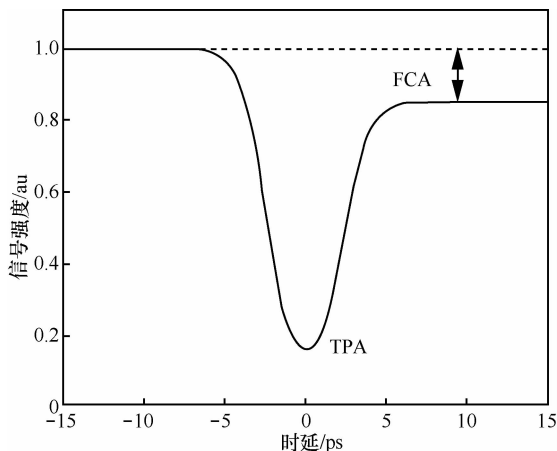


图 20 XAM 调制输出信号波形

研究人员还对不同泵浦功率下的调制深度进行了实验测试,如图 21 所示。随着耦合输入功率的增加,器件的调制深度也不断增加。器件在泵浦功率为 10 W 时达到了目前所报道的 IV 族波导最高的调制深度 8.1 dB。

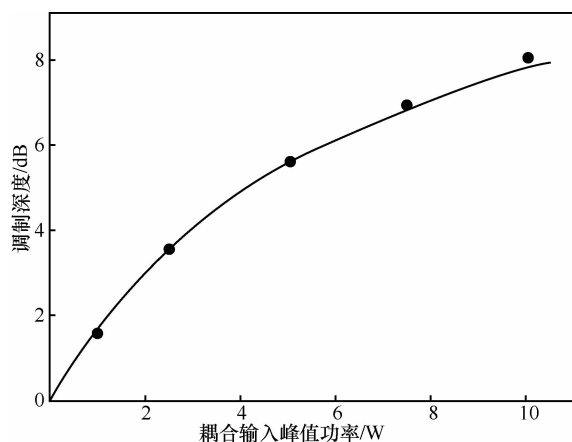


图 21 XAM 调制深度对应泵浦功率曲线

7 结束语

CMOS 兼容,成本低廉的硅基光电子技术在传统通信领域大放异彩的同时,在中红外应用器件的制造中也日渐

凸显优势。本文主要介绍了近 5 年来研究人员面向中红外应用的硅基光电子器件的最新研究进展和成果。引入硅基光电子技术,可以显著改善目前中红外应用器件体积庞大、制造流程繁琐的缺陷,而片上实验系统概念的提出,使得基于非线性光学的各种传感器件有望实现大规模集成,从而显著提升器件的传输和监测效率。在通信方面,拓宽通信光谱至中红外波段,可以有效地解决目前数据传输爆炸效应带来的近红外通信容量紧缩的问题。并且由于硅基光电子在传统通信波段领域成熟的研究成果和中红外波段良好的传输、非线性性能,利用硅基光电子技术实现中红外通信将成为大势所趋。

参考文献

- 1 Baehr-Jones T. Silicon-on-sapphire integrated waveguides for the mid-infrared. *Opt Express*, 2010(18): 12127~12135
- 2 Milošević M. Rib waveguides for mid-infrared silicon photonics. *J Opt Soc*, 2009(B26): 1760~1766
- 3 Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 495~497
- 4 Raghunathan V, Borlaug D, Rice R R, *et al.* Demonstration of a mid-infrared silicon Raman amplifier. *Opt Express*, 2007 (15): 14355~14362
- 5 Liu X, Osgood R M, Vlasov Y A, *et al.* Mid-infrared optical parametric amplifier using silicon nanophotonic waveguides. *Nature Photon*, 2010(4): 557~560
- 6 Milošević M M. Silicon waveguides and devices for the mid-infrared. *Appl Phys Lett*, 2012(101): 121105
- 7 Nedeljkovic M. Silicon photonic devices and platforms for the mid-infrared. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9)
- 8 Cheng Z. Focusing sub wavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide. *Opt Lett*, 2012, 37(7): 1217~1219
- 9 Cheng Z. Mid-infrared suspended membrane waveguide and ring resonator on silicon-on-insulator. *IEEE Phot J*, 2012, 4(5): 1510~1519
- 10 Milošević M M. Silicon waveguides for the 3~4 μm wavelength range. *Proceedings of the 8th IEEE Conference on Group IV Photonics (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, New York, USA, 2011: 208~210
- 11 Baehr-Jones T. Silicon-on-sapphire integrated waveguides for the mid-infrared. *Opt Express*, 2010,18(12): 12127~12135
- 12 Li F. Low propagation loss silicon-on-sapphire waveguides for the mid-infrared. *Opt Express*, 2011,19(16): 15212~15220
- 13 Spott A. Silicon waveguides and ring resonators at 5.5 μm . *Appl Phys Lett*, 2010, 97(21): 213501

- 14 Shankar R. Integrated high-quality factor silicon-on-sapphire ring resonators for the mid-infrared. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(5): 051108
- 15 Mashanovich G Z. Low loss silicon waveguides for the mid-infrared. *Opt Express*, 2011, 19(8): 7112~7119
- 16 Khan S, Chiles J, Fathpour S. Silicon-on-nitride waveguides for mid- and near-infrared integrated photonics. *Appl Phys Lett*, 2013, 102(12): 121104
- 17 Spott A. Mid-infrared photonics in silicon. *Proceedings of SPIE* 2011, California, USA, 2011
- 18 Zhang L, Yue Y, Beausoleil R G, *et al.* Flattened dispersion in silicon slot waveguides. *Opt Express*, 2010(18): 20529~20534
- 19 Milošević M M. Silicon waveguides and devices for the mid-infrared. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(12): 121105
- 20 Reimer C. Mid-infrared photonic crystal waveguides in silicon. *Opt Express*, 2012, 20(28): 29361~29368
- 21 Fan L, Wang J, Varghese L T, *et al.* An all-silicon passive optical diode. *Science*, 2012(335)
- 22 Zhang X Z. All-optical diode in mid-infrared waveband based on self-phase modulation effect in silicon ring resonator. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(2)
- 23 Bristow A D, Rotenberg N, van Driel H M. Two-photon absorption and Kerr coefficients of silicon for 850~2200 nm. *Appl Phys Lett*, 2007(90): 191104
- 24 Claps R, Raghunathan V, Dimitropoulos D, *et al.* Influence of nonlinear absorption on Raman amplification in Silicon waveguides. *Opt Express*, 2004(12): 2774~2780
- 25 Liang T K, Tsang H K. Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides. *Appl Phys Lett*, 2004(84): 2745~2747
- 26 Soref R A, Emelett S J, Buchwald W R. Silicon waveguided components for the long-wave infrared region. *J Opt*, 2006(8): 840~848
- 27 Jalali B. Prospects for silicon mid-IR Raman lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE J Sel Top Quant Electron*, 2006(12): 1618~1627
- 28 Jalali B, Fathpour S J. Silicon photonics. *Lightwave Technol*, 2006(24): 4600~4615
- 29 Soref R. Toward silicon-based longwave integrated optoelectronics (LIO). *Proceedings of SPIE* 6898, Bellingham, USA, 2008
- 30 Ebrahim-Zadeh M, Sorokina I T. *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications*. New York: Springer, 2007
- 31 Liu X, Osgood R M J, Vlasov Y A, *et al.* Mid-infrared optical parametric amplifier using silicon nanophotonic waveguides. *Nature Photon*, 2010(4): 557~560
- 32 Zlatanovic S. Mid-infrared wavelength conversion in silicon waveguides using ultracompact telecom-band-derived pump source. *Nature Photon*, 2010(4): 561~564
- 33 Schliesser A, Picque N, Haensch T W. Mid-infrared frequency combs. *Nat Photonics*, 2012(6): 440~449
- 34 Maddaloni P. Mid-infrared fibre-based optical comb. *New J Phys*, 2006(8): 262
- 35 Sorokin E, Sorokina I T, Mandon J, *et al.* Sensitive multiplex spectroscopy in the molecular fingerprint 2.4 mm region with a Cr²⁺: ZnSe femtosecond laser. *Opt Express*, 2007(15): 16540~16545
- 36 Adler F. Phase-stabilized, 1.5 W frequency comb at 2.8~4.8 mm. *Opt Lett*, 2009(34): 1330~1332
- 37 Hugi A, Villares G, Blaser S, *et al.* Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser. *Nature*, 2012(492): 229~233
- 38 Pearl S, Rotenberg N, van Driel H M. Three photon absorption in silicon for 2300~3300 nm. *Appl Phys Lett*, 2008(93): 131102
- 39 Lin Q, Painter O J, Agrawal G P. Nonlinear optical phenomena in silicon waveguides: modeling and applications. *Opt Express*, 2007(15): 16604~16644
- 40 Griffith A G. Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation. *Nat Commun*, 2015(6): 6299
- 41 Oehrlein G S. Dry etching damage of silicon: a review. *Mater Sci Eng*, 1989(4): 441~450
- 42 Desiatov B, Goykhman I, Levy U. Demonstration of submicron square-like silicon waveguide using optimized LOCOS process. *Opt Express*, 2010(18): 18592~18597
- 43 Griffith A, Cardenas J, Poiras C B, *et al.* High quality factor and high confinement silicon resonators using process. *Opt Express*, 2012(20): 21341~21345
- 44 Levy J S. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects. *Nat Photonics*, 2009(4): 37~40
- 45 Lamont M R E, Okawachi Y, Gaeta A L. Route to stabilized ultrabroadband microresonator-based frequency combs. *Opt Lett*, 2013(38): 3478~3481
- 46 Vivien L, Polzer A, Marris-Morini D, *et al.* Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon. *Opt Express*, 2012, 20(2): 1096~1101
- 47 Sheng Z, Liu L, Brouckaert J, *et al.* InGaAs PIN photodetectors integrated on silicon-on-insulator waveguides. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1756~1761
- 48 Wang X, Cheng Z, Xu K, *et al.* High responsivity graphene/silicon heterostructure waveguide photodetectors. *Nat Photonics*, 2013, 7(11): 888~891
- 49 Logan D F, Jessop P E, Knights A P. Modeling defect enhanced detection at 1550 nm in integrated silicon waveguide photodetectors. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(7): 930~937
- 50 Thomson D. Optical detection and modulation at 2~2.5 μm in silicon. *Opt Express*, 2014(22): 10825~10830
- 51 Ackert J J. High-speed detection at two micrometres with monolithic silicon photodiodes. *Nat Photonics*, 2015 (9): 393~397
- 52 Foster P J, Doyle J K, Mascher P, *et al.* Optical attenuation



- in defect-engineered silicon rib waveguides. J Appl Phys, 2006(99): 073101
- 53 Nedeljkovic M, Soref R, Mashanovich G Z. Free-carrier electro-refraction and electro-absorption modulation predictions for silicon over the 1~14 μm wavelength range. IEEE Journal of Photonics, 2011, 3(6): 1171~1180
- 54 Sang X, Tien E K, Boyraz O. Applications of two photon absorption in silicon. J Optoelectron Adv Mater, 2008(11)
- 55 Liang T K, Tsang H K, Day I E, *et al.* Silicon waveguide two-photon absorption detector at 1.5 μm wavelength for autocorrelation measurements. Appl Phys Lett, 2002(81)
- 56 Li S. Two-photon absorption and all-optical modulation in germanium-on-silicon waveguides for the mid-infrared. Opt Lett, 2015(10): 2213~2216
- 57 Hon N, Soref R, Jalali B. The third-order nonlinear optical coefficients of Si, Ge, and Si1-xGex in the midwave and longwave infrared. Appl Phys, 2011(110)

[作者简介]



舒浩文,男,北京大学信息科学技术学院硕士生,主要研究方向为硅基高速调制器。



苏昭崇,男,北京大学信息科学技术学院硕士生,主要研究方向为硅基二维材料光电子器件。



王兴军,男,博士,北京大学信息科学技术学院教授,中国光学学会光电技术专业委员会、中国光学工程学会委员会、中国宇航学会光电技术专业委员会、亚洲光子学、国际光学仪器与技术等国际学术会议技术委员会委员。Advances in Condensed Matter Physics 等 SCI 期刊客座编辑,国家“863”计划信息领域项目评审专家,国家自然科学基金、教育部博士点基金、北京市自然科学基金等基金的通讯评议人。主要研究方向为高速硅基光电子器件与系统应用、硅基稀土发光材料器件。



周治平,男,博士,北京大学信息科学技术学院教授、博士生导师,教育部长江学者。OSA Fellow、SPIE Fellow、IET Fellow、IEEE、OSA 资深会员,中华光电学会(PSC)终身会员,中国光学学会理事,IEEE 中国武汉分会创会主席(2006-2008 年)。美国光学学会与中国激光杂志社联合刊物 Photonics Research 创刊主编,英国 IET Electronics Letters 中国版主编(2008-2010 年),英国 IET Optoelectronics 编委,Chinese Optics Letters 专题编委,Frontiers of Optoelectronics 编委,《红外与激光工程》编委。曾任美国乔治亚理工学院微电子研究中心的资深研究员及 CMOS 工艺中心主任,美国 NSF、DOE、DOD 项目评委及美国 NSF 课题负责人。在硅基光源、纳米光栅、光电调制、光学传感、光电探测、光子晶体、慢光、表面等离子体及硅基光电集成方面取得了重要的进展。研究工作于 2007 年、2011 年被《激光与光电子学进展》评为中国光学十大进展。多次主持和参加主持了 IEEE、SPIE、OSA 及中国光学学会举办的国际学术会议。