

文章编号: 0258-7025(2009)03-0547-07

硅基光子器件研究进展及其在光陀螺与光通信中的应用

燕路¹ 肖志松¹ 张峰¹ 朱放¹ 周博¹ 黄安平¹ 朱永昌²

(¹ 北京航空航天大学理学院物理系, 北京 100191; ² 中国建筑材料科学研究总院, 北京 100024)

摘要 光通信对高带宽要求的不断增强以及计算机芯片对高性能计算的不断需求刺激了硅基光子器件的发展, 使之向集成化、低成本方向发展, 并取得了一系列重要的理论和技术突破。综述了近期硅光子器件如硅基光源、放大器、光调制器的最新研究进展, 并对现有技术在未来光陀螺及光通信中的应用进行了分析和设计。设计了一种三维有源谐振环结构以实现全集成化的谐振式光波导陀螺, 展示了硅基光子器件在光陀螺及光通信应用等方面的广阔前景。

关键词 硅基光子器件; 绝缘硅; 放大器; 硅基激光器; 调制器; 光陀螺; 光通信

中图分类号 O436.4; TN248.4; TN256; TN929.1; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0547

Advances of Silicon-Based Integrated Photonic Devices and Applications in Optical Gyroscope and Optical Communication

Yan Lu¹ Xiao Zhisong¹ Zhang Feng¹ Zhu Fang¹
Zhou Bo¹ Huang Anping¹ Zhu Yongchang²

(¹ Department of Physics, School of Science, Beihang University, Beijing 100191, China)
(² China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

Abstract Stimulated by the ever-increasing demands of wide-bandwidth in optical communication and high-performance computing in microprocessor, silicon photonic devices are entering into the integrated and low-cost trend, and series of significant breakthrough both in theory and technology are achieved. Recent progress in the development of these photonic devices such as silicon laser, amplifier and modulator are reviewed, and their applications in optical gyroscope and optical communication are analyzed and designed. A three-dimension active resonator is designed to achieve the intergrated resonance optical gyroscope. The outlook and potential applications of these devices in future optical gyroscope and optical communication systems are presented.

Key words silicon photonic devices; silicon-on-insulator; amplifier; silicon laser; modulator; optical gyroscope, optical communication

1 引言

硅基光子学兴起于 20 世纪 80 年代末对无源波导器件的研究, 作为一门新兴的学科正越来越得到世界各国研究机构和科学家的高度重视和广泛研

究。其内容主要涉及硅基光子器件如光源、光放大器、调制器等集成器件及与硅相关光学性质的研究。目前正在发展的新一代光通信系统对集成化、小型化和大数据量的要求不断增加, 与此同时, 微处理器

收稿日期: 2008-07-20; 收到修改稿日期: 2008-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(10604003)、北京市科技新星计划(2006B15)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0045)资助项目。

作者简介: 燕路(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事凝聚态物理与光电材料方面研究。E-mail: yanluphys@gmail.com

导师简介: 肖志松(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事凝聚态物理、纳米光电子学及新能源材料与物理方面的研究。E-mail: zsxiao@buaa.edu.cn (通信作者)

金属互连技术已经成为限制微芯片系统中数据传输速率的一大瓶颈。由于光具有巨大的带宽和速度,光互连自然成为下一代高速通信技术的选择。而硅基光子器件将在低成本光互联技术中扮演重要角色,因为硅基光子集成器件可以完全兼容于现有成熟的微电子 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 制造工艺。另一方面,SOI (silicon-on-insulator) 材料和技术的发展为实现这一想法提供了一个理想的平台。由于 Si 和 SiO₂ 较高的折射率错配 ($n_{\text{Si}} = 3.45, n_{\text{SiO}_2} = 1.45$), 光可以紧束缚在波导中,这使得可以大幅缩小平面硅基光子器件尺寸。同时,由于较高的折射率错配,可以在芯片级的 SOI 波导结构中观察到很强的非线性光学效应,如拉曼效应和克尔效应。这也改变了人们对硅的一些传统观点,随即出现了如硅基激光及调制器等器件。因此,关于硅基光子器件的研究、应用及其发展方向成为众多研究人员关注的焦点。Jalali 等^[1~5]在他们的综述性文章中较为系统地介绍了集成硅光子器件在包括光互联、光芯片、高速光通信等方面的广泛应用,以及硅光子器件的发展前景。

本文综述了近期硅光子器件的最新进展及光在光陀螺与光通信中的应用。

2 光放大器和激光器

由于硅的间接带隙结构,通常认为晶体硅的发光效率极低,实现晶体硅中的光放大甚至激光效应一直是极具挑战性的问题之一。1990 年,Canham^[6]首先报道了室温条件下多孔硅结构高效的光致发光,随后他又和 Cullis^[7]联合报道了多孔硅结构从红光到绿光波段的可见发光。一年后,Koshida 等^[8]成功实现了多孔硅在可见光波段的电致发光。然而,科学家对于纳米结构硅的发光起源一直未有定论。2008 年,Godefroo 等^[9]报道他们通过强磁场实验推断,发光主要源于纳米微晶内的缺陷,驳斥了早期将发光归因于量子限制效应的看法。Yoffe 在文献^[10]中对低维硅结构如硅量子点、线的电学光学性质进行了系统深入的讨论。另一个实现硅基发光的途径是掺 Er 硅发光。从 20 世纪 90 年代起就有很多研究组对掺 Er 硅进行了长期而系统的研究^[4,11~13]。掺 Er 硅发光的主要问题是有效地阻止 Er³⁺ 向 Si 的能量反向传递,这一过程严重影响着发光效率。

实现了硅的发光,如何得到有效的光放大自然成为下一步研究重点。Van den Hoven 等^[14]在

1996 年报道了掺 Er 硅基波导中的光增益。他们在硅衬底上制作了 Er : Al₂O₃ 波导,整个平面器件面积仅 15 mm²,对 1.53 μm 的传输光得到了 2.3 dB 的光增益。2000 年,Pavasi 等^[15]在 nc-Si / SiO₂ 结构中得到了光的增益。2002 年,J. H. Shin 的研究组^[16]制备了有纳米晶硅(nc-Si)结构的单模 Er 掺杂波导,通过顶部的 477 nm Ar 激光抽运,获得了 1535 nm 信号光约 7 dB/cm 的净增益。更多的相关掺 Er 硅波导光放大器的研究可参见文献^[17~19]。2005 年,Cloutier 等^[20]在周期状纳米晶硅中观察到了光增益和受激发射。由于光在硅中的拉曼散射比石英光纤中强 1000 倍,基于 SOI 波导结构的受激拉曼散射效应以及拉曼光放大器也得到了广泛研究^[21~24]。

在不同硅结构中得到了光增益的结果促使人们考虑将硅作为激光活性介质的可能。近几年,硅激光器领域取得连续的突破性进展。2004 年,Tsang 的研究组^[24]展示了第一个利用受激拉曼散射效应的 SOI 波导光放大器,获得了 6.8 dB 信号光增益。他们在 SOI 片 $[1\ 0\ 0]$ 面上沿 $[1\ 1\ 0]$ 方向制备了硅光子线波导,线波导损耗为 0.3 dB/cm。为了测量拉曼增益,他们设计的实验装置以 1557.4 nm 的抽运光,产生 1694.6 nm 的受激拉曼散射光,两种光的偏振态通过偏振器校准。定性地得到了与偏振态相关的拉曼光净增益:采用 TE 态光抽运,TE 态和 TM 态受激拉曼散射光皆有增益;采用 TM 态光抽运,TE 态光达到最高增益而 TM 态光无增益。他们发现通过增加抽运光脉冲峰值能量仍有可能提高净增益(>7.8 dB),但随着抽运光能量的增大,净增益也将趋于饱和,因为双光子吸收(TPA, two photon absorption)产生的自由载流子将减小光增益。而 TPA 这一非线性光学效应产生的自由载流子吸收被认为是 SOI 波导中受激拉曼散射的最主要损耗^[25],当电子吸收两个光子跃迁后,会产生电子-空穴对。随着光吸收的不断继续,积累的电子-空穴对越来越多,这些自由载流子复合时间相对较长,它们的存在会吸收抽运光能量,降低抽运效率;还会吸收产生的拉曼散射光,使激射过程无法持续。2004 年,Jilali 研究组^[26]报道了第一个 SOI 拉曼激光器。他们通过脉冲光抽运的方式减小了由 TPA 而产生的自由载流子的有效寿命(有效寿命表征了波导中自由载流子和光模式的相互作用时间),成功实现了激发功率阈值为 9 W,斜率效率 8.5% 的 1675 nm 脉冲激光。

2005 年,Intel 的 Rong 等^[27]通过设计一个反偏

的 p-i-n 结构有效地降低了自由载流子的有效寿命,他们采用标准微电子工艺制作了第一个连续波长硅基拉曼激光器。激光器结构如图 1 所示^[27]。脊型波导是在未掺杂的 SOI 结构 Si 的 [1 0 0] 表面上通过标准的光刻和蚀刻工艺制成,在其两侧的平板分别注入硼和磷形成 p-i-n 结构,反偏的 p-i-n 二极管大大降低了 TPA 引发的载流子吸收。当给它加反偏电压时,TPA 产生的电子-空穴由于受到 p-i-n 结构的电场作用,被迅速地清除出了波导区,因此有效载流子寿命随着反偏压的增强而减小。这一结构成功得到了稳定的边模抑制比为 55 dB,线宽小于 80 MHz 的单模激光输出。其激光阈值依赖于反偏电压,波长可通过改变抽运波长调节。

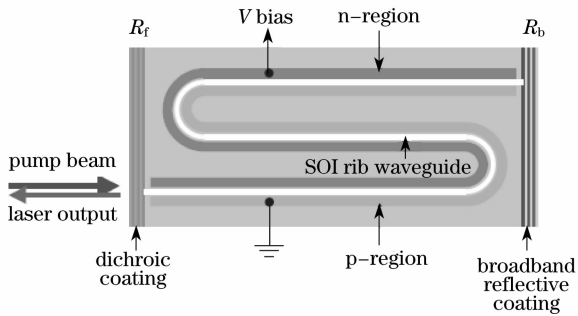


图 1 第一个连续硅基拉曼激光器结构示意图^[27]

Fig. 1 Scheme of the first CW silicon Raman laser^[27]

硅基拉曼激光的实现是硅激光领域内的重要突破,但是它仍然只实现了红外波段激光,未能实现可见光波段激光。在 Intel 报道了他们的拉曼激光后,

表 1 不同硅基激光器总结

Table 1 Summary of different silicon lasers

Material	Integrate method	Pump	Wavelength /nm	Time /Institutes
Er-doped microcavity	ion implantation	1465 nm CW	1557	2004 /Caltech&FOM ^[31]
SOI	all silicon	1540 nm pulse	1675	2004/UCLA ^[26]
SOI	all silicon	1550 nm CW	1686	2005 /Intel ^[27]
Eu:GaIn-Si	heterogenous epitaxy	337.1 nm pulse	620	2005 /Cincinnati ^[28]
AlGaIn/InP-Si	bonding to silicon	Electrical	1577	2006 /UCSB&Intel ^[30]
SOI	all silicon	1550 nm CW	1686, 1848	2008 /Intel ^[29]
III-V quantum dots- α -Si	direct epitaxy	Electrical	1000	2008 /Umich ^[32]

在所有硅基光电集成器件的研究中,硅激光器是重中之重。进一步的研究将会在增益材料类型、器件结构形式和电致激发方式等方面进行优化研究。

3 调制器

光调制器是利用材料折射率的变化,对传输光的相位和波长进行调制的光波导器件,是光通信系统中的关键器件,也在光互联技术和未来光子计算

Steckl 研究组^[28]宣布,他们研制成功世界上第一个可见光波段的硅激光器。他们在硅衬底上用分子束外延技术生长了 Eu^{3+} 掺杂的多层 AlGaIn 结构,实现了室温下阈值约为 117 kW/cm^2 ,波长 620 nm 的激光输出。

2008 年,Rong 研究组^[29]又报道了级联式拉曼激光,利用受激拉曼散射的级联效应将硅基拉曼激光波长拓展至 1686 nm 和 1848 nm。这一激光器采用环形谐振腔和 1550 nm 光抽运,实现了稳定的、连续的、输出功率超过 5 mW、线宽小于 2.5 MHz 的 1848 nm 二阶级联激光,为实现更高阶拉曼激光铺平了道路。

尽管上述研究已经取得突破性进展,但是仍然面临一个问题:即以上述及的激光器都需要抽运光激发,若想将硅基激光器完全地单片集成,就必须实现载流子注入(电抽运)形式的激光光源。UCSB 和 Intel 合作研究的成果在一定程度上解决了这一难题,Bowers 领导的研究组成功研发了首个采用标准微电子工艺制造的电抽运 III-V 族化合物混合硅基倏逝波激光器^[30],加速了硅基光源集成化应用的步伐。器件分两部分:III-V 族化合物有源区(包括周期性的超晶格、未应变的异质结和多量子阱结构层)以及 SOI 波导无源区。将 AlGaInAs 多量子阱倏逝波激光器键合在 SOI 波导上,利用倏逝波原理将光耦合至 SOI 波导。激光的阈值电流为 65 mA,最大输出功率 1.8 mW,最高工作温度 40°C 。表 1 总结了了几种硅基激光器的实现途径。

机领域有着重要的应用前景。光强调制器通常是基于马赫-曾德尔干涉的调制,或基于直接光吸收的光传导调制。现在已经商业化应用的 LiNbO_3 调制器^[33, 34]便是利用马赫-曾德尔效应的相位调制器,其典型调制速度已可达 40 Gb/s。

为了实现和其他硅光子器件的单片集成,硅基材料高速调制器的研究成为国际关注的重点。硅通常被认为电-光作用很微弱,硅的相位调制可以通过

热-光作用和所谓的“自由载流子等离子体散射”作用实现。其中热-光作用响应较慢,不适合将光的调制应用于光互联技术。在自由载流子等离子体散射作用中,当硅材料中的自由载流子密度发生改变时,它的反射率和光吸收系数都会发生相应改变。一般可以通过向正偏 p-i-n 二极管结构中注入电流的方式控制自由载流子密度。然而,由于调制速度取决于载流子注入、转移速率,一般认为硅调制速度很有限(带宽一般为 MHz 左右)。

2004 年,Intel 研究人员 Liu 等^[35]报道他们成功研制出 1 Gb/s 的 SOI 硅调制器。这种调制器是基于金属-氧化物-半导体(MOS)电容器而非传统的 p-i-n 二极管结构的,从而使载流子注入速率大幅提高。而此前的报道利用硅制成的调制器,速度都在 20 Mb/s 以下,从未超过这个速度^[36, 37]。一年后,他们改进了该调制器设计,将速度提高至 10 Gb/s^[38]。至 2005 年,Intel 报道了硅基电光调制器的 3 dB 带宽达 30 GHz,并得到了 40 Gb/s 的信号传输的最新结果,达到目前商用 III-V 族和 LiNbO₃ 外调制器的水平^[39, 40],其结构如图 2 所示^[37]。它是一个马赫-曾德尔调制器,它的两只臂都是反偏的 p-n 节,当反向偏压加载时,自由载流子将被驱除出 p-n 节,通过自由载流子效应改变它的折射率。调制器的光强可以由调节两臂干涉光的相位差来调制。此调制器的速度非常快,因为自由载流子大约 7 ps 就能被驱除出 p-n 节区域。同时,利用 Intel 之前实现的硅激光器,使芯片间的光互联成为可能。

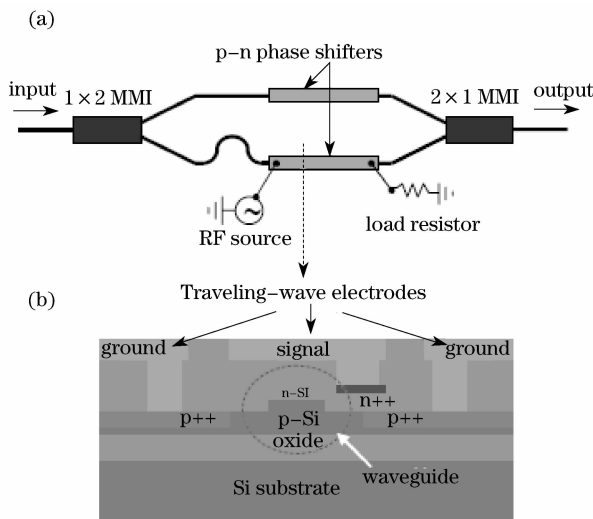


图 2 40 Gb/s 光调制器结构示意图^[38]

Fig. 2 Configuration of 40 Gb/s optical modulator^[38]

另一方面,由于微环形谐振器具有共振增强作用,很小的折射率微扰就能导致共振峰的移动,注入

载流子的浓度不需要达到稳态即可获得较高的调制深度。2005 年,Lipson 领导的研究组^[41]设计了一个微米级单片的亚纳秒级电光开关调制器。调制器由 SOI 上的一段直波导以及与之相耦合的直径为 12 μm 的谐振环组成。通过改变谐振环的折射率,可以实现对多特定波长光的快速调制,这一硅基集成器件的成功,对发展未来波分复用(WDM)光互连技术的应用有重要意义。Lipson 小组同时还对全光调制器进行了研究,利用光激发载流子注入实现了对光信号的快速调制,相应器件可用于全光网络中^[42, 43]。

事实上,实现高速光电调制的解决方案还包括半导体光电调制器^[44]、硅基光子晶体调制器^[45, 46]以及有机材料调制器^[47]等。特别值得一提的是 Jiang 等^[35~40]设计的 p-i-n 结构光子晶体调制器,其调制臂长仅为 80 μm ,而硅基马赫-曾德尔调制器的调制臂通常为毫米量级。该光子晶体调制器可以降低器件尺寸和功耗^[45],但是它的调制速度仍然低于 1 Gb/s。未来对于如何实现集成化高速光电调制器的研究将继续受到世界各国研究人员的重视。

4 硅光子器件在光陀螺及光纤通信系统中的应用

近年来的一系列突破性进展推动了硅基光子学逐步走向实用的潜力。人们已不再怀疑硅(特别是 SOI 材料)作为下一代集成光子学材料的可能性,转而去寻找这些集成光子材料与器件的应用领域。光学陀螺就是其中之一。

光学陀螺是一种利用萨格纳克(Sagnac)效应测量旋转角速率的新型全固态惯性仪表。光纤陀螺现已在导航、自动控制等领域获得了较为广泛的应用。光学陀螺未来将向小型化、集成化和低成本化方向发展,而硅基光子学的研究会极大地推进这一进程。硅基光学陀螺光路部分集成化将涉及硅光源、硅波导环制作、耦合器、调制器、光探测器等器件的混合集成或者完全的单片集成。商业化的干涉型光陀螺已经可以实现 LiNbO₃ 衬底上的光功能模块化集成,现有技术完成全部器件的单片集成尚有困难。

早在 1997 年,法国 CEA-Leti 公司的 Mottier 报道了第一个在硅上单片集成的固态光学陀螺仪。他们制作了直径 3 cm,总长 80 cm 的波导环结构,实现了 1°/s 的测量精度^[48]。虽然那时没有实现光源、探测器的集成,但这一成果在光陀螺集成化和低成本化的道路上迈出了坚实的一步。

2000年, Suzuk等^[49]报道了基于硅平面光路单片集成的谐振式光学陀螺。他们在硅平面集成光路上集成了约14.8 cm的谐振环、定向耦合器和光开关, 并使用频率可调激光二极管作为光源, 研究了不同因素对谐振光学陀螺的噪声因子的影响。

随后的研究大多集中在设计制作硅基平面谐振环结构以期得到优良的谐振性能以及如何处理信号的调制解调方面, 并没有涉及集成光源和探测器的研究^[50~53]。基于近期硅基光子器件的突破进展, 未来光学陀螺的研究可以向全光子集成方向发展, 也即将光源、波导环、耦合器、调制器、探测器等集成在同一芯片中, 进一步减小器件体积, 降低成本, 实现规模化生产。

由于工作原理不尽相同, 硅光子集成器件在谐振式光陀螺中可以有较为广泛的应用。利用集成平面光路技术, 将构成光纤陀螺最小互易性结构的光学器件以波导的形式集成起来, 不仅可以减小陀螺尺寸, 而且还有利于批量生产和降低成本。最重要的是和传统光纤陀螺相比, 谐振式光波导陀螺有以下优势: 1) 光路长度短, 极大降低了各种由于光纤分布而引起的漂移; 2) 采用激光光源, 相干性好, 波长稳定性高; 3) 谐振频率与旋转角速度正相关, 所以理论上已证明其精度高于传统干涉式光纤陀螺。

三轴的光纤陀螺发射/接收集成模块已在实验室研制成功, 它的三个感应轴使用同一个超辐射发光二极管光源, 并把调制器、分束器、探测器集成到同一个芯片上, 整个模块小于5 cm×2 cm×2 cm。若使用光波导及硅基光子集成技术将三轴谐振式光波导陀螺集成在同一芯片上, 其体积将进一步大幅减小。通常实现光波导小型化有两种不同的途径。第一种是通过增加包层/芯层折射率差值最大限度地缩小光波导尺寸, 如被广泛研究的SOI波导结构。然而这种结构的波导集成方式仅限于平面光路(2维)集成且多为无源结构^[48~51], 从而在一定程度上限制了其发展。第二种方式就是在体材料中充分利用其特征实现分层的波导器件集成, 也就是本文提出的一种基于玻璃有源三维集成化波导谐振环结构的三轴光陀螺解决方案。

相比硅基薄膜波导, 玻璃波导有较低的传播损耗, 可以方便地引入光增益, 可以很好地与标准光纤实现低损耗耦合, 因而受到广泛研究和重视。玻璃材料也因制备工艺简单、成本低廉而使之成为制造低成本光集成器件提供很好的选择。Hsiao等^[54]利用试验证明, 在谐振环波导中适当引入增益可以大幅

度提高谐振环清晰度。

此方案中利用飞秒激光超短脉冲聚焦到稀土掺杂玻璃内部, 在焦点区域产生非线性吸收引起材料结构变化进而产生正折射率变化, 实现不同方位(深度)不同尺寸(模式)的波导结构。经过设计模拟波导尺寸, 即有可能实现不同功能的光学器件集成在同一块玻璃材料中, 实现三维光学集成, 为集成化光波导陀螺提供一种新思路。三维谐振环结构示意图如图3所示。

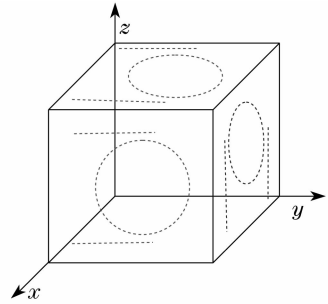


图3 三维玻璃波导谐振环结构示意图

Fig. 3 Configuration of a 3-D glass waveguide resonator

由于此波导谐振环需在玻璃中制作且要求产生光增益, 玻璃材料体系与稀土离子掺杂就变得异常重要。先前的工作在不同的体系中对稀土离子的发光机制及玻璃体系对发光的影响做了较为详细的研究^[55, 56]。在Er-Yb掺杂磷酸盐玻璃中利用飞秒激光直写了不同深度的直波导, 相关工作还在进行中。

未来谐振式光陀螺特别是谐振式全集成光波导陀螺将被广泛应用于各种精度需求领域, 发挥其体积优势以及高精度优势, 逐步取代干涉式光纤陀螺, 应用于航空、航天、航海和战略导弹等领域。

目前, 光纤通信系统中应用最多的硅基光子器件主要包括有各类光耦合器(Coupler, Splitter)、平面波导阵列光栅(AWG)、波分/解波分复用器、阵列型可变光衰减器(VOA)、可调谐光滤波器(OTF)、EDWA及可调谐增益均衡器等。图4展示了其中一个典型的商业化硅光子器件, 也就是Kotura公司生产的8通道VOA^[57]。此产品用于多路复用器自动信道均衡, 已在北电网络大都市光通信网的产品中应用。图5展示的是Lextera公司以其当时的4信道波分复用收发器为原型提出的可用于光通信系统的新型硅光子集成器件^[58]。它利用90 nm SOI CMOS工艺制造, 单片集成了驱动电路、激光器、调制器、滤波器、光探测器、放大器等器件, 应用于未来光纤通信系统中将可实现大规模标准化生产, 降低器件体积以及成本。

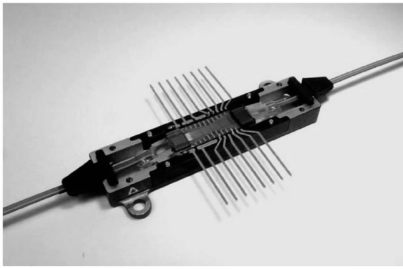


图4 Kotura公司商业化硅光子器件:8信道VOA^[57]

Fig. 4 Commercial silicon photonics product from Kotura Co.: Eight-channel VOA^[57]

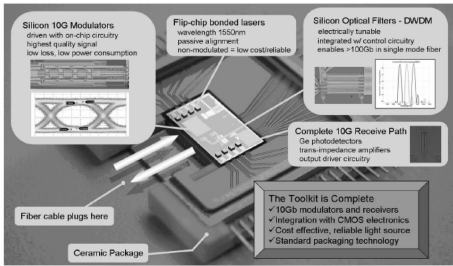


图5 Lextera公司10 Gb/s光收发器原型^[58]

Fig. 5 Prototype of 10 Gb/s transceiver from Luxtera Corporation^[58]

随着光纤通信技术的不断发展,硅光子器件将在光有源器件、光无源器件以及全光网络中得到广泛而重要的应用,特别是全光网络相关技术的不断成熟,硅光子器件特别是集成器件无疑将在整个光纤通信系统中扮演重要的不可或缺的角色。

5 结论与展望

近年来,由于受光通信系统集成化和低成本化的驱动,以及计算机芯片对光互联代替传统金属互连技术进而突破速度瓶颈的强烈需求,硅基光子学取得一系列突破性进展,硅基光子器件呈现微纳化和高度集成化的趋势。回顾了一些重要硅基光子器件研究进展,介绍了不同集成化器件的解决方案,结合在光学陀螺仪及光纤通信系统中的应用对硅基光子器件未来发展趋势及应用进行了展望。介绍了谐振式光波导陀螺的优势以及应用前景,设计了一种三维有源谐振环结构以实现全集成化的谐振式光波导陀螺。

随着对硅基光子学相关理论的深入研究,基于新发现和新理论的新型光子器件必将不断涌现。同时,现有器件和成熟微电子制造工艺的兼容性将不断提高。随着硅基光子技术逐渐达到实际应用的水平,将给芯片间互联、底板布线技术带来革命性的变化,从而引发一场新的信息技术革命。

参考文献

- 1 B. Jalali, S. Fathpour. Silicon photonics[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4600~4615
- 2 A. S. Liu, M. Paniccia. Advances in silicon photonic devices for silicon-based optoelectronic applications[J]. *Phys. E*, 2006, **35**(2): 223~228
- 3 M. Lipsor. Guiding, modulating, and emitting light on silicon - challenges and opportunities[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4222~4238
- 4 A. Polman, F. van Veggel. Broadband sensitizers for erbium-doped planar optical amplifiers: review[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(5): 871~892
- 5 N. Paniccia, M. Morse, M. Salib. Integrated Photonics, in *Silicon Photonics*[M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2004, 51~88
- 6 L. T. Canham. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(10): 1046~1048
- 7 A. G. Cullis, L. T. Canham. Visible-light emission due to quantum size effects in highly porous crystalline silicon[J]. *Nature*, 1991, **353**(6342): 335~338
- 8 N. Koshida, H. Koyama. Visible electroluminescence from porous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(3): 347~349
- 9 S. Godefroy, M. Hayne, M. Jivanescu *et al.*. Classification and control of the origin of photoluminescence from Si nanocrystals[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2008, **3**(3): 174~178
- 10 A. D. Yoffe. Semiconductor quantum dots and related systems: electronic, optical, luminescence and related properties of low dimensional systems[J]. *Adv. Phys.*, 2001, **50**(1): 1~208.
- 11 L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta, K. D. Hirschman *et al.*. Room-temperature photoluminescence and electroluminescence from Er-doped silicon-rich silicon oxide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(14): 1790~1792
- 12 F. Iacona, D. Pacifici, A. Irrera *et al.*. Electroluminescence at 1.54 μm in Er-doped Si nanocluster-based devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(17): 3242~3244
- 13 K. Suh, J. H. Shin, S. J. Seo *et al.*. Er³⁺ luminescence and cooperative upconversion in Er_xY_{2-x}SiO₅ nanocrystal aggregates fabricated using Si nanowires[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(12): 121910-1~121910-3
- 14 G. N. Van den Hoven, R. Koper, A. Polman *et al.*. Net optical gain at 1.53 μm in Er-doped Al₂O₃ waveguides on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(14): 1886~1888
- 15 L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni *et al.*. Optical gain in silicon nanocrystals[J]. *Nature*, 2000, **408**(6811): 440~444
- 16 H. S. Han, S. Y. Seo, J. H. Shin *et al.*. Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon oxide waveguide amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(20): 3720~3722
- 17 P. G. Kik, A. Polman. Erbium doped optical-waveguide amplifiers on silicon[J]. *MRS Bull.*, 1998, **23**(4): 48~54
- 18 J. Lee, J. H. Shin, N. Park. Optical gain at 1.5 μm in nanocrystal Si-sensitized Er-doped silica waveguide using top-pumping 470 nm LEDs[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 19~25
- 19 X. Orignac, D. Barbier, X. M. Du *et al.*. Sol-gel silica/titania-silicon Er/Yb-doped waveguides for optical amplification at 1.5 μm [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **12**(1): 1~18
- 20 S. G. Cloutier, P. A. Kossyrev, J. Xu. Optical gain and stimulated emission in periodic nanopatterned crystalline silicon[J]. *Nat. Mater.*, 2005, **4**(12): 887~891
- 21 R. Claps, V. Raghunathan, D. Dimitropoulos *et al.*. Influence of nonlinear absorption on Raman amplification in silicon waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(12): 2774~2780
- 22 R. L. Espinola, J. I. Dadap, R. M. Osgood *et al.*. Raman

- amplification in ultrasmall silicon-on-insulator wire waveguides [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(16): 3713~3718
- 23 M. A. Foster, A. C. Turner, J. E. Sharping *et al.*. Broad-band optical parametric gain on a silicon photonic chip [J]. *Nature*, 2006, **441**(7096): 960~963
- 24 T. K. Liang, H. K. Tsang. Efficient Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(16): 3343~3345
- 25 T. K. Liang, H. K. Tsang. Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(15): 2745~2747
- 26 O. Boyraz, B. Jalali. Demonstration of a silicon Raman laser [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5269~5273
- 27 H. S. Rong, R. Jones, A. S. Liu *et al.*. A continuous-wave Raman silicon laser [J]. *Nature*, 2005, **433**(7027): 725~728
- 28 J. H. Park, A. J. Steckl. Demonstration of a visible laser on silicon using Eu-doped GaN thin films [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(5): 056108
- 29 H. S. Rong, S. B. Xu, O. Cohen *et al.*. A cascaded silicon Raman laser [J]. *Nat. Photonics*, 2008, **2**(3): 170~174
- 30 A. W. Fang, H. Park, O. Cohen *et al.*. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9203~9210
- 31 A. Polman, B. Min, J. Kalkman *et al.*. Ultralow-threshold erbium-implanted toroidal microlaser on silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(7): 1037~1039
- 32 J. Yang, P. Bhattacharya, Z. Mi *et al.*. Quantum dot lasers and integrated optoelectronics on silicon platform [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 727~731
- 33 E. L. Wooten, K. M. Kissa, A. Yi Yan *et al.*. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(1): 69~82
- 34 Li Mi, Yu Siyuan, Ma Jing *et al.*. Research on the design of LiNbO₃ waveguide intensity modulator with a new back slot structure [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 410~413
李 密, 于思源, 马 晶 等. 新型衬底开槽结构的 LiNbO₃ 波导强度调制器设计分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 410~413
- 35 A. S. Liu, R. Jones, L. Liao *et al.*. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor [J]. *Nature*, 2004, **427**(6975): 615~618
- 36 C. K. Tang, G. T. Reed. Highly efficient optical-phase modulator in SOI wave-guides [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6): 451~452
- 37 P. Dainesi, A. Kung, M. Chabloz *et al.*. CMOS compatible fully integrated Mach-Zehnder interferometer in SOI technology [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 660~662
- 38 L. Liao, D. Samara-Rubio, M. Morse *et al.*. High speed silicon Mach-Zehnder modulator [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3129~3135
- 39 A. S. Liu, L. Liao, D. Rubin *et al.*. High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 660~668
- 40 L. Liao, A. Liu, D. Rubin *et al.*. 40 Gbit/s silicon optical modulator for highspeed applications [J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(22): 1196~1197
- 41 Q. F. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan *et al.*. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. *Nature*, 2005, **435**(7040): 325~327
- 42 S. R. Preble, Q. F. Xu, B. S. Schmidt *et al.*. Ultrafast all-optical modulation on a silicon chip [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2891~2893
- 43 K. Preston, P. Dong, B. Schmidt *et al.*. High-speed all-optical modulation using polycrystalline silicon microring resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(15): 151104-1~151104-3
- 44 B. Mason, A. Ougazzaden, C. W. Lentz *et al.*. 40-Gb/s tandem electroabsorption modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 27~29
- 45 Y. Q. Jiang, W. Jiang, L. L. Gu *et al.*. 80-micron interaction length silicon photonic crystal waveguide modulator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(22): 3
- 46 W. Jiang, L. Gu, X. Chen *et al.*. Photonic crystal waveguide modulators for silicon photonics; Device physics and some recent progress [J]. *Solid-State Electron.*, 2007, **51**(10): 1278~1286
- 47 Y. Enami, C. T. Derosé, D. Mathine *et al.*. Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients [J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(3): 180~185
- 48 P. Mottier, P. Pouateau. Solid state optical gyrometer integrated on silicon [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(23): 1975~1977
- 49 K. Suzuki, K. Takiguchi, K. Hotate. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1): 66~72
- 50 H. L. Ma, X. L. Zhang, Z. H. Jin *et al.*. Waveguide-type optical passive ring resonator gyro using phase modulation spectroscopy technique [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 080506
- 51 M. S. Shahriar, G. S. Pati, R. Tripathi *et al.*. Ultrahigh enhancement in absolute and relative rotation sensing using fast and slow light [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(5): 053807
- 52 J. Yuan, X. W. Long. Optical-axis perturbation in nonplanar ring resonators [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(5): 1204~1210
- 53 Yang Zhihuai, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 814~819
杨志怀, 马慧莲, 郑阳明 等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 814~819
- 54 H. K. Hsiao, K. A. Winick. Planar glass waveguide ring resonators with gain [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 17783~17797
- 55 Z. S. Xiao, R. Serna, C. N. Afonso. Broadband emission in Er-Tm codoped Al₂O₃ films; The role of energy transfer from Er to Tm [J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(3): 033112
- 56 Z. S. Xiao, L. Yan, B. Zhou *et al.*. Optical properties of Tm-Er codoped aluminate glasses [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2008, **52**: S54~S57
- 57 <http://www.kotura.com/>
- 58 C. Gunn. CMOS photonics for high-speed interconnects [J]. *IEEE Micro*, 2006, **26**(2): 58~66