评述

硅基光电子学的最新进展

王兴军*, 苏昭棠, 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

*联系人, E-mail: xjwang@pku.edu.cn

收稿日期: 2014-08-08; 接受日期: 2014-10-29

国家高技术研究发展计划(编号: 2011AA010302)、国家自然科学基金(批准号: 61036011, 61377056, 61120106012)及教育部新世纪优秀人才计划资助项目

摘要 随着人们对信息容量、速度以及成本的迫切要求, 低成本、高度集成的硅基光电子学蓬勃发展, 成为光通信、高速计算机等领域的研究热点和非常有前景的关键技术. 硅基光电子学是一种可以用硅基集成电路上的投资、设施、经验以及技术来设计、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. 最近几年, 硅基光电子集成技术已经发展到了一个崭新的阶段, 各个关键的硅基光电子器件都已经达到商用化的标准, 部分性能甚至超过目前的商用器件, 引起了产业界的广泛关注. 本文从硅基光电子学的几个关键器件入手, 包括波导、光栅、偏振分束器、混频器、滤波器、调制器、探测器和激光器, 详细介绍了该方向的研究进展, 特别是最近 5 年的重大突破; 随后介绍了硅基光电子学在光互连、光通信、光传感、太阳能电池等几方面的重大应用; 最后提出硅基光电子学未来发展方向和目前面临的主要挑战.

关键词 硅基光电子学, 硅基发光, 硅基调制器, 锗探测器, 无源器件

PACS: 42.82.-m, 85.60.Jb, 42.79.Hp, 85.60.Gz, 42.79.Gn

doi: 10.1360/SSPMA2014-00300

1 引言

信息技术是当今世界经济社会发展的重要驱动力, 在信息技术的发展进程中, 以硅为主的微电子技术扮演着重要角色, 超大规模、高性能的微处理芯片为海量信息处理提供了核心技术支撑. 40 多年来, 微电子技术正按照“摩尔定律”飞速发展, 但随着特征尺寸减小到 10 nm 以下, 微电子产业能否再依照“摩

尔定律”前进则面临挑战¹⁾.

在高性能计算领域, 微处理芯片由单核单线程向多核多线程发展, 芯片中/间的互连技术变得越来越重要. 互连技术正朝着高速率和高密度集成发展, 以满足多核间以及芯片与外部间高效、大容量信息传输的需要. 然而, 随着微电子技术的进一步发展, 现有的电互连技术将无法满足不同微处理芯片功能增长的需求, 这主要是因为金属互连的寄生效应在高速率

1) <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>

引用格式: 王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 014201

Wang X J, Su Z T, Zhou Z P. Recent progress of silicon photonics (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 014201, doi: 10.1360/SSPMA2014-00300

传输中会引起电信号的剧烈衰减和功耗大幅上升^[1]. 为了满足高性能计算机高速发展的技术需求, 片上光互连技术已经成为亟待解决的关键性技术. 为此, 将微电子和光电子结合起来, 充分发挥硅基微电子先进成熟的工艺技术、高密度集成及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的硅基光电子学已经成为了信息技术发展的必然和业界的普遍共识, 被认为是片上光互连最具有潜力的方案^[2-4].

在光通信领域, 光通信的每一个里程碑式发展都依赖于基础光电子器件的突破. 当前光通信的一个发展趋势是, 类似于电的集成电路和片上系统一样, 光通信系统也将逐渐集成在单一光电子芯片上, 只有集成化才能实现高密度、低成本、低能耗, 满足未来信息社会环保绿色的需求^[5]. 目前用于光通信的光电子器件种类繁多, 价格昂贵, 一直制约其大规模的应用, 而目前“国家宽带战略”的实施, 迫切需要大规模的低成本器件来实现光纤到户. 例如, 爱立信公司 2009 年公布的吉无源光网络(G-PON)中的关键组成单元之一——光路终端(ONU)光模块中的成本表明, 光发射和接收组件的成本占整个光模块的 70% 以上, 随着传输速率的提高, 光器件成本所占的比例将会更高. 由此可见, 光发射和接收器件的成本很大程度上决定了 ONU 光模块的成本. 因此, 降低光发射和接收器件的成本是降低整个 ONU 光模块的关键. 随着制作工艺技术的发展, 高密度的硅基光电集成是光电器件实现低能耗、低成本发展的必然趋势. 另外, 从基于硅材料的微电子工业本身来考虑, 众多的专业公司使得硅基光电子学更加具备了坚实的工业背景和光明的市场前景. 因此, 发展硅基光电子学, 成为光通信领域里的研究热点和重要发展方向. 国际三大光通信国际会议(OFC²⁾, ECOC³⁾, ACP⁴⁾)近几年也都在会议中增加了硅基光电子学主题, 充分体现了硅基光电子学是光通信的重要发展趋势之一.

硅基光电子学的发展可以追溯到 20 世纪 80 年代中期由 Soref 等人^[6,7]的开拓性工作. 他们的工作主要集中在硅上波导、开关和调制器的研究. 最近几年, 硅基光电子集成技术已经发展到了一个新的阶段,

新技术新器件层出不穷, 有关硅的各种传统观念被新的实验结果一一突破. 2004 年 Intel 公司在 Nature 上报道了调制带宽超过 1 GHz 的硅基高速光波导调制器^[8]; 2005 年 Intel 公司研制出了 1550 nm 光泵浦的激光波长为 1686 nm 的连续硅基拉曼激光器^[9]; 2006 年 Intel 公司和加州大学联合研制成功了世界上首个电泵浦连续激光硅基 III-V 族混合集成激光器^[10]; 2007 年 Intel 公司将硅基光电调制器的 3 dB 带宽扩展到 30 GHz, 实现了 40 Gbits/s 的信号传输, 达到商用 III-V 族和铌酸锂外调制器的水平^[11]; 2008 年美国 Luxtera 公司向世人展示了世界上第一块在 130 nm CMOS 生产线上制造的硅基单片集成高速 CMOS 光子收发模块, 采用 WDM 技术, 数据传输速率 4×10 Gbps^[12]. 2012 年阿尔卡特朗讯的 Bell 实验室的 Doerr 等人^[13]和 Dong 等人^[14]研制成功了 112 Gb/s 的 QPSK 调制格式的光发射机和同样高速率的相干接收机. 2013 年 IBM 报道了在 90 nm CMOS 工艺线集成了电路和光路的 25 Gb/s WDM 系统, 第一次实现了真正意义的单片光电集成^[15].

在国内, 近年来在国家重点基础研究发展计划、国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金等支持下, 中国科学院半导体研究所、北京大学、浙江大学、南京大学、华中科技大学、上海交通大学等单位从多方面对硅基光电子技术开展了研究, 取得了一定的研究成果. 在硅基调制器方向上, 中科院半导体所研制出世界上速率最快的硅基调制器和低能耗的调制器^[16]; 在探测器方向上, 中科院半导体所实现了在低温下生长缓冲层上生长锗材料, 并能实现 12 路锗-硅光电探测器阵列的制造, 其探测带宽在 20 GHz 以上, 性能良好^[17]. 在片上集成方面, 北京大学正在研制 100 Gbs 硅基相干发射及传输系统. 已经证明单路发射与接收可以达到 30 Gb/s, 并在 80 km 传输情况下显示了比其他技术有更好的能耗效率^[18,19].

本文的目的是一方面回顾硅基光电子学这个领域的历史, 另一方面旨在通过描述近 5 年来的最新突破来评估硅基光电子学潜在的影响及目前的挑战. 下面具体从激光器与放大器、无源器件、调制器、探测器以及系统集成 5 个方面分别进行描述.

2) <http://www.sanfrancisco.travel/groups/OFC-2014.htm>

3) <http://www.ecoc2013.org/programme-overview.html>

4) <http://www.acp-conf.org>

2 激光器与放大器

硅基光源是硅基光电子学元器件中的重中之重. 由于硅是间接带隙的半导体, 发光效率不高, 因此硅一直以来被认为不适合制作光源材料, 但由于其巨大的潜在价值, 人们一直没有放弃在硅上制备激光器的努力, 从 20 世纪 90 年代发现多孔硅的室温发光, 2000 年观察到纳米硅的增益, 直到最近几年硅拉曼激光器、III-V 族-硅混合激光器、锗硅激光器, 无不引起世界光电子研究学者的极大关注, 给大家显示出成功制备硅基激光器的曙光.

图 1 给出了硅的能带结构^[20]. 由图可见, 硅导带和价带的极值对应于不同的波矢 k , 是间接带隙的半导体, 辐射复合几率很低, 同时存在两个强非辐射跃迁过程: 俄歇复合和自由载流子吸收. 电子-空穴对的辐射寿命长(毫秒量级), 一个电子-空穴对需要毫秒才能复合. 在此期间, 电子和空穴移动的体积达到 $10 \mu\text{m}^3$. 这样他们很容易遇到缺陷或俘获中心, 载流子就会发生非辐射复合. 在硅中, 典型的非辐射寿命是纳秒量级, 因此内量子效率 η 约为 10^{-5} – 10^{-6} . 许多具有战略性的研究正在开展来克服这种硅限制, 它们大部分都属于以下 5 种类型: (1) 使用量子限制效应来克服硅的间接带隙结构; (2) 引入稀土掺杂作为发光中心; (3) 使用拉曼散射获得光学增益; (4) 利用外延技术或键合技术制备基于 III-V 混合集成的激光器; (5) 利用能带工程把间接带隙变成直接带隙.

2.1 量子限制

因为硅的辐射复合寿命比非辐射复合寿命要长很多, 所以受激载流子有足够的时间在穿过硅中的

图 1 (网络版彩图) 硅的能带图

Figure 1 (Color online) The diagram of silicon bandgap.

一些缺陷和泵浦的热损耗前获得合适的声子. 一个常见的克服这个问题的方法是利用量子限制效应. 1990 年, Canham^[21]报道了多孔硅在室温下可以辐射较强的可见光. 从此, 以深入研究多孔硅发光性能为起点, 人们开始了对纳米硅光源的研究热潮. 一个很流行的方法是利用纳米硅富硅氧化物薄膜上实现量子限制, 富硅氧化物薄膜中的纳米硅因为量子限制效应可以增加载流子的辐射跃迁几率, 提高电子-空穴的注入效率. 另外还可以通过控制纳米晶的尺寸控制受激发射的波长. 采用这种硅基低维材料制作的硅发光二极管, 已获得从红外到紫外光波长范围的强光发射, 室温下的外量子效率可高达 1.6%^[22]. 如果将硅纳米晶粒置入一个具有强光限制效应的微腔结构中, 还可以实现某一波长范围的窄谱线强光发射^[23]. 富硅氧化硅材料发光特性和纳米硅晶的浓度、尺寸以及退火温度有很强关系, 而控制纳米硅晶的浓度和尺寸的工艺比较复杂. 同时, 纳米硅的发射光带宽极限于 800–900 nm, 这仍然是在 1320 nm 和 1550 nm 的两个光通信窗口之外.

2.2 稀土离子掺杂

在硅中掺入一定浓度的稀土元素, 充分利用稀土元素丰富的粒子能级结构发出不同波长的光来满足实际的需要. 其中稀土铒(Er)可以发出 $1.53 \mu\text{m}$ 的光, 对应于光纤通信中的石英玻璃吸收的最小值, 且该波长的能量受激发功率和所处环境温度影响较小, 是硅基光电子学的标准波长. 因而, 掺 Er 硅发光是一种很有发展前途的硅基发光材料. 目前有两个方向正在开展, 一个是掺 Er 富硅氧化硅(氮化硅)^[24–26], 另一个是用 Er 的硅酸盐化合物^[27–32].

与掺铒硅相比, 富硅氧化硅中的硅纳米晶是一个很好的 Er 敏化剂, 能量转移效率可以达到 70%. 目前报道的最好结果是韩国 Shin 教授研究小组^[33]制备掺 Er 富硅氧化硅放大器, 在 1 cm 长的波导中获得了 4 dB 的光增益. 但该系统还存在一些问题, 如 Er 和硅纳米晶的耦合仍然不完全, 报道仅有 5% 的 Er 被耦合纳米硅晶, 其他通过 Er 的直接吸收激发. 而且, 光增益和纳米硅晶的浓度密切相关, 控制纳米硅晶尺寸和浓度的工艺较复杂; 并且由于纳米硅晶的存在, 它受载流子吸收的限制, 即使通过精确控制 Er 和纳米硅晶的浓度, 吸收仍很大, 很难获得高增益. 但最近经过科学家的不断努力也取得了一定进展,

其中实现了铒富硅氧化硅电泵浦的强发光. 他们采用的结构与 MOS 结构类似, 注入的载流子首先会进入氧化层, 而纳米硅把能量转移给铒离子, 从而实现电泵浦^[34]. 但这种类型器件的发射效率仍然不高. 除了载流子注入时的自由载流子吸收外, 另一个不利因素是铒离子在富硅氧化层的固溶度还不够, 当铒离子浓度很强时铒离子趋于形成铒的氧化物. 因为铒氧化物的介电常数要比二氧化硅的还要高, 铒氧化物内的电场很低, 不足以有效地加速电子来激活铒离子^[35]. 所以, 与光致发光的情况相同, 仍然需要更多的研究使铒离子在富硅氧化层更加均匀. 2012 年, Jambois 研究小组^[36]已经获得 1% 能量效率和 20% 铒离子反转的电致发光铒掺杂激光器. 这是在该类型系统中目前报道最高的效率. 图 2 显示了器件的铒粒子数反转随电子注入流量的关系. 此外, 如何降低电压阈值和实现室温工作也应该是未来研究的重要方向.

但对于传统掺杂方法, 由于铒离子在硅或二氧化硅材料中的固溶度问题使铒离子掺杂浓度低, 最大只能达到 10^{19} cm^{-3} , 难以获得更高的增益. 铒硅酸盐化合物(Er_2SiO_5 或 $\text{Er}_2\text{Si}_2\text{O}_7$)中的铒离子浓度比传统掺铒材料高 2–3 个数量级, 且接近 100% 的铒离子都具有光学活性, 同时可以采用标准的 CMOS 工艺来制造, 这些特性使其成为实现硅基集成的高增益有源器件的有力候选材料. 国际上几个研究组对这种材料的发光和增益特性进行了大量的研究工作^[27–30]. 但由于铒硅酸盐化合物中铒离子浓度很高, 导致较

强的能量上转换效应, 因此最近几年, 人们开始考虑采用铈(Y)或者镱(Yb)共加入的办法来分散铒离子(Yb 和 Y 与 Er 的离子半径相似), 来达到降低 Er 的能量上转换效应^[37–40]. Y 共加入铒硅酸盐(铒铈硅酸盐: $\text{Er}_x\text{Y}_{2-x}\text{SiO}_5$ 或 $\text{Er}_x\text{Y}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_7$)可以通过改变铈和铒的浓度比例, 连续可控地调整铒离子的浓度, 从而减轻铒-铒相互作用导致的能量上转换效应, 进而提高器件的效率和增益. 用化学方法制备的 $\text{Er}_x\text{Y}_{2-x}\text{SiO}_5$ 纳米团簇中, 上转换系数比掺铒二氧化硅的低一个数量级^[37]. 用磁控溅射制备的铒铈硅酸盐化合物光波导, 1480 nm 波长的激光激发时, 可以获得 60% 的粒子数反转和 0.5 dB/cm 的材料增益^[38]. 在另一个研究中, 用铒浓度 1.25 at% 的 $\text{Er}_x\text{Y}_{2-x}\text{SiO}_5$ 材料设计波导, 654 nm 波长激发时, 理论计算有可能产生高达 10 dB/mm 的增益^[39]. 镱共加入的铒硅酸盐(铒镱硅酸盐: $\text{Er}_x\text{Yb}_{2-x}\text{SiO}_5$ 或 $\text{Er}_x\text{Yb}_{2-x}\text{Si}_2\text{O}_7$)同样可以连续调节铈和铒的比例, 而且镱具有光学活性, 是铒的高效感光剂, 被广泛用在掺铒光纤放大器或激光器中, 以提高铒的泵浦效率. 铒镱硅酸盐中镱对铒的感光作用已经得到证实^[40], 用铒镱硅酸盐制作的光波导中, 也观察到光信号增强现象^[40]. 这些实验表明铒镱硅酸盐也是有前景的硅基有源光学材料. 由于铒硅酸盐是电介质材料, 其绝缘性导致注入电流非常困难^[41]. 本研究小组采用了增加 SiON 限流层的办法成功观察到室温电致发光^[42–43], 如图 3 所示, 并预测可以获得 30 dB/cm 以上的电增益. 但到目前为止仍然无法得到理论预期的高增益铒铈/铒硅酸盐化合物光波导放大器和电致激光, 根据本小组这几年的研究发现主要原因是波导的传输损耗很大, 达到 8 dB/cm^[44]. 这是由于铒铈/铒硅酸盐化合物中的铒离子需要高温才能被激活, 而材料在高温生长过程中需要结晶, 导致表面粗糙, 另外在刻蚀成波导过程中, 材料侧壁也比较粗糙, 导致传输损耗很大. 为了减少传输损耗, 众多学者采用了多种方法^[44,45], 2012 年 Yin 等人^[46]提出铒氯硅酸盐化合物纳米线, 通过控制生长条件可以生长出单晶铒氯硅酸盐化合物纳米线, 由于材料是单晶, 表面缺陷非常少, 这样波导的传输损耗可以大大降低. 另外一个新奇的现象是发现该纳米线在高铒浓度下(10^{22} cm^{-3}), 荧光寿命仍然没有降低, 可以得到 540 μs , 比铒硅酸盐化合物薄膜的荧光寿命(20 μs)高 27 倍, 这可以保证在采用较低的泵浦光功率就可以实现粒子数反转和高的光增益, 从而可能解决无法

图 2 器件的铒粒子数反转随电子注入流量的关系, 插图显示为上升速率随电子注入流量非线性行为

Figure 2 Estimation of the inverted Er fraction for both devices. Inset shows the nonlinear behaviour of the reciprocal rise rate with flux.

图 3 (网络版彩图) (a) 钇镱硅酸盐的电致发光谱; (b) 钇镱硅酸盐的材料增益

Figure 3 (Color online) (a) EL spectra of Er-Yb silicate; (b) materials gain of Er-Yb silicate.

获得更高的泵浦光功率的问题。但首先纳米线的精确尺寸控制, 以及纳米线也纳米尺度和光纤的微米尺度的耦合, 如何准确测量纳米线波导的传输损耗和增益特性还面临不小的困难。

2.3 受激拉曼散射

拉曼散射是光通过介质时入射光与分子运动相互作用而引起散射光频率发生变化的散射。硅材料中受激拉曼散射是一种非线性光学现象, 即只有高功率密度的光入射硅材料才会出现较强的拉曼散射光, 在此过程中高能量密度的泵浦光被硅吸收并转换为激光能量, 同时硅材料完成振转能级间的跃迁, 这样就克服的硅材料发光效率低的缺点。2002 年, 拉曼散射首先被提出用来实现硅基激光器和放大器^[47]。两年后, 加州大学洛杉矶分校的 Jalali 研究小组^[48]实现了基于拉曼效应的首个硅激光器。2005 年, 又实现了在硅拉曼激光器的直接调制, 这在传统的二氧化硅拉曼激光器是不可能实现的, 激起了大家在单片上集成激光器的美好愿望。同一年 Intel 公司的研究

人员 Rong 等人^[9]报道了首个波长可调的硅拉曼激光器。其硅波导为 S 型结构, 总长度为 4.8 cm, 波导宽度为 1.5 μm 、高为 1.55 μm 、刻蚀深度为 0.7 μm 。将硅波导制成 S 型可以减少硅片尺寸, 便于硅器件的集成。采用 PIN 二极管结构, 通过在硅波导两侧加反向偏置电压, 来减少波导内的载流子浓度, 从而抑制自由载流子对激光的吸收。当 PIN 结两侧反向偏置电压为 25 V 时, 激光阈值为 0.4 μW , 斜率效率为 9.4%。紧接着, 该小组又通过对器件结构进行合理改善。利用由多层介电薄膜覆盖的 SOI 光波导形成的光学微腔, 实现了稳定的单模激射输出, 并研制成了连续拉曼激光器。2008 年又实现了基于微环的级联拉曼激光器。但该拉曼激光器需要很高功率的光泵浦, 从原理上无法实现电泵浦的激光器, 限制了其进一步的发展^[49]。

近几年, 硅拉曼光电子学的应用也延展到中红外波长^[50], 即大概 2000–6000 nm 的波长范围。今年 Liu 等人^[51]通过使用硅纳米光波导在 2200 nm 下获得了 25 dB 增益的光学参数放大。加州大学的 Zlatanovic 等人^[52]也报道在长 3.8 mm, 面积 0.35 μm^2 的波导里中红外波段的参数到达 2388 nm。上述两者也利用了硅中四波混频的非线性效应, 即两束频率为 ω_p 的泵浦光把能量传递给微弱的信号光 ω_s 和新信号光 ω_i , 且保持 $2\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 的关系。不像拉曼效应, 如果能实现相位匹配, 四波混频效应能够在较大带宽下实现参数放大。这个可以通过离差工程进行细心设计和精确控制波导交叉部分^[53]。此外硅量子多级激光器也是应用于中红外光谱的可选方法。然而, 尽管已获得上述成果, 但由于会产生大量热以及片上兼容等有待解决的一些问题, 硅中红外光激光器和放大器的解决方案仍需进一步观察。总之, 中红外波段仍然是一个很具潜力的平台或者说是未来硅光电子研究领域的重要分支。

2.4 锗硅激光器

由于锗的带隙是 0.8 eV, 与通信波长要求的 1550 nm 相适应, 且与硅 CMOS 工艺具有很高的兼容, 这使得在硅上单片集成包括锗调制器、锗探测器及现在的锗激光器等器件成为可能。虽然锗由于其间接带隙材料的原因曾经被认为是不适合用作光发射材料, 但它现在可以被看做伪直接带隙材料, 因为其直接 Γ 谷和间接 L 谷间的能量非常低(0.134 eV)。这使

得在锗上观察电致发光成为可能. 基于锗的激光器的想法首先由 Liu 等人^[54]在理论上进行了证实, 其表明 1550 nm 波长下在锗中用适合的能带结构工程能获得有效光发射和光增益. 根本上说, 锗中有 3 种方法实现到直接带隙的转变, 包括量子限制、应变、n 型高浓度掺杂. 虽然锗和硅中的量子限制效应可以使锗的间接带隙与 1550 nm 波长匹配. 结果, 由于电子不受限制, 锗硅量子结构仍然保持间接带隙材料的特性, 这会导致低的光发射效率.

第二种方法是引入应变来改变锗的能带结构. 已经可以表明在 1.8% 的拉伸应变下可以完全变成直接带隙材料. 通常热延展不匹配能在锗硅间引入了拉伸应变, 因为这种应变不受锗层厚度的限制^[55]. 然而, 当应用 1.8% 的应变时, 相应的光发射波长会因为应变下的带隙收缩而漂到大约 2300 nm 附近, 这已经在通信波段范围之外了. 取而代之的是, 0.25% 的拉伸应变能很好地实现锗激光器^[56,57], 且硅上的外延锗只出现 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 非常低的外延位错密度^[58]. 在这个条件下锗并没有完全地变成直接带隙材料, 所以通过 n 型非纯掺杂可以实现直接带隙发射效率的提高. 10^{19} cm^{-3} 重掺杂水平通常能够实现高的发射效率, 与没掺杂样品相比效率可以提高 14 倍^[59]. 这与传统的激光器不同, 因为传统激光器通常会因为重掺杂导致载流子吸收的损失. 然而, 锗中的直接 Γ 谷和间接 L 谷间几乎所有的能级状态都被来自 n 掺杂的均衡电子所占据. 所以这种情况下注入电子会占据更高的能级状态. 这事实上降低了注入电流密度的阈值, 所以载流子吸收也相应降低了. 此外, 由于锗中直接转移的辐射复合率要比间接转移的要快 4-5

倍, 所以在 Γ 谷中的注入电子要比在 L 谷中的更快被耗尽, 进而使得更多的电子进入 Γ 谷准平衡状态. 因此, n 型重掺杂是提高锗光发射有效的方法.

2012 年 MIT 的 Kimerling 研究小组^[60]在前期硅基高响应、高速的外延锗探测器和低功耗外延锗光电调制器的基础上, 利用 1590 nm 光泵浦、沟道波导谐振腔实现了 1590 nm 光致发光的 n 掺杂锗硅激光器. 此后, 2012 年该研究小组又研制成功了世界上首个光通讯波段室温工作的锗电致激光^[61]. 图 4 为测试系统和激光发射谱.

2.5 III-V 族化合物和硅混合集成激光器

上面几种方法虽然都观察到了一些激射现象, 但有很多都是光泵浦的, 并且泵浦功率都很大, 这和硅基片上光源电致、低功率的要求不符. 因此一种变通的方法是采用混合集成的片上光源, 利用 III-V 族发光性能好的优点, 采用键合等工艺将 III-V 族材料的器件与硅基光电子器件混合集成在同一个基底上. 这种方法的主要障碍是砷化镓和铟磷与硅分别有 4.1% 和 8.1% 的晶格不匹配, 热延展系数不匹配则分别为 120.4% 和 76.9%. 结果, 传统的异质外延生长由于 2 个材料的晶格常数失配较大导致了大的线程和位错密度. 最近, 有许多方法可以实现把 III-V 族层集成到 SOI 衬底上. 直接分子键合^[62,63]和 DVS-BCB 粘合^[64]都可以在低温下用于硅中生长高质量铟磷层, 已经有几个 SOI 上的高性能铟磷激光器的报道^[65,66]. 铟磷激光器和硅波导间的耦合可以通过使用消逝波的耦合方式来实现^[67]. 对于砷化镓, 除了上述的这 2 种方法, 最近也有利用锗硅和铟化镓缓冲层的先进

图 4 锗电泵激光器测试系统(a)和激光发射谱(b)

Figure 4 Ge electrically pumped laser setup (a) and lasing spectrum (b).

外延生长技术^[68]使得室温下硅上基于砷化镓的波长连续二极管激光器成为可能. 2005 年, 密歇根大学的 Bhattacharya 研究小组^[69]在室温下实现了在硅上直接生长 InGaAs 量子点的激光器. 此外, 外延生长激光器的另一个令人兴奋的想法是利用像 GaNAsP 等与硅相同晶格常数的材料^[70], 图 5 为 Chang-Hasnain 教授研究组在硅上生长的 III-V 激光器. III-V 族外延生长的方法的另一个挑战是与 CMOS 工艺兼容. 另外, 高温下, III-V 族元素可作为渗杂剂逐渐溶解进硅层, 减轻 III-V 离子扩散问题仍需进一步研究.

3 无源器件

3.1 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)和外延损耗(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; 当波导尺寸相当小时(如 SOI 波导), 由于硅表面场强和界面粗糙, 后者将起主要作用.

由于硅基光电子器件需要集成化和小型化, 因此光波导一般需要强的光学限制, SOI 由于硅($n=3.45$)与二氧化硅($n=1.45$)比较大的折射率差, 使得波导对光具有很强的束缚能力, 这导致波导尺寸可减小到 $0.1 \mu\text{m}^2$. 其横向或纵向尺寸都能够与今天的 CMOS

工艺的要求保持一致. 因此成为硅基光电子学的主要基体材料平台. 但是随着尺寸的减小, 与器件结构的理想轮廓的偏差会成为主要问题. 尤其因不成熟的光刻技术引起的侧壁粗糙将导致波导内芯和包层界面的散射, 这将成为传输损耗的主要来源^[71,72]. 其一般能达到 0.2–3 dB/cm, Yap 等人^[73]研究了侧壁粗糙度和波导大小对应的散射损耗.

表面粗糙度可以通过热氧化有效地降低^[74,75]. 更高的温度及更长的热氧化时间会显著地改善界面粗糙度, 当温度达 1100°C 、热氧化时间 1 h 就足够避免侧壁扭曲^[74,75]. 然而, 这种方法的缺陷是这个过程消耗了更多的硅, 而且在硅上引入了多余的压力^[76]. 散射损耗则可以通过氮化硅^[77]进行表面封装或者在氢气中退火^[77,78]来降低, 如此可提高硅原子的表面迁移率, 而这些迁移原子能够使得表面变得更平滑^[76]. 然而这些方法涉及比较严格的加工条件. 更重要的是, 它们并不具选择性, 这就意味着一些在相同芯片上本不应该进行同时处理的其他组件也会受到影响, 尤其是对于高集成度芯片更显著. 一种比较新颖的解决办法是通过使用液化溶解来完善(Self-Perfection by Liquefaction, SPEL). 比如一种波长 308 nm 和脉宽 20 ns 的氯化氙激光器就被应用于选择性地融化波导表层, 且最终光滑侧壁还能再凝固, 如图 6 所示^[79]. 基于这种方法, 已经有报道实现了表面粗糙度从 13 nm 降到 3 nm, 由粗糙度引起的传输损耗则从 53 dB 将至 3 dB/cm. 这种方法的另一个优势是这个过程反应时间很快(约 100 ns). 已经有研究组在 SOI

图 5 (网络版彩图) 硅上生长的 III-V 激光器 SEM 图(a)和激光光谱(b)

Figure 5 (Color online) SEM picture (a) and laser spectrum (b) of III-V laser bonding Si.

图 6 (a) 二氧化硅上的硅波导未处理前的侧壁粗糙; (b) 在 900 mJ/cm^2 的 20 个激光脉冲, 1 Hz 重复率作用后效果
Figure 6 (a) SEM picture of Si waveguide before annealing; (b) SEM picture of Si waveguide after annealing.

上盖 Si_3N_4 层, 实现了 0.8 dB/cm 的损耗^[80].

3.2 光栅

单模光纤到硅波导的光耦合问题是无源器件的另一个挑战. 因为硅基光波导尺寸是非常小的, 在纳米量级的硅光波导与单模光纤之间存在着一个相当大的模式不匹配. 所以, 如果波导和单模光纤直接耦合的话, 其耦合损耗会非常大. 一个常见的方法是使用表面光栅(图 6a)从单模光纤对接耦合光^[81-84], 在 1550 nm 光的实验条件下耦合效率大约 65.6% ^[84], 且能通过优化光栅设计和硅片厚度使效率预计达到 90% ^[82,83]. 因为光可以在芯片上任意角度的位置注入或引出, 传统的晶圆测试便可以不用借助透膜或表面抛光来处理^[84]. 此外, 光栅型耦合的对准容差相对也比较大(一般对准误差 $\pm 1 \mu\text{m}$ 时才会有 $>1 \text{ dB}$ 附加损耗), 所以能够降低封装成本^[82-84]. 虽然垂直光栅耦合的带宽相对较窄, 但 45 nm 的 3 dB 带宽已经能够满足较大范围应用^[84]. 此外, 使用相同结构的透镜, 也能实现垂直耦合^[85]. 本研究小组一直致力于二

元闪耀光栅的研究^[86,87], 最近通过优化设计获得了 90% 以上的耦合效率和大的角度容差. 如图 7 所示.

2014 年德国 Stuttgart 大学报道了一种光栅, 底部有金属铝反射镜提高耦合方向性. 同时设计啁啾型光栅达到衍射场和光纤高斯模式的最优匹配, 得到仿真结果为 -0.33 dB , 实验结果为 -0.62 dB , 如图 8(b)所示, 这是目前报道的最高耦合效率^[88]. 但该耦合光栅高耦合效率要增加多个反射层, 这使工艺变得复杂, 因此还需要简化工艺, 使其能用标准的 CMOS 工艺制备.

3.3 滤波器

随着在波分复用和解复用中的应用, 光滤波器已经成为现代光网络的主要组成器件. 早期的工作可追溯到 20 世纪 90 年代和 21 世纪初波导阵列光栅(AWG)的使用^[89,90], 硅基无源滤波器具有体积小、重量轻, 与 CMOS 工艺的兼容性等特点, 使其成为现代滤波器的重要研究对象. 鉴于适合现代工业化的大批量生产, 无论在民用通信系统还是在军事通信系

图 7 (网络版彩图) (a) 二元闪耀光栅的耦合效率; (b) 角度容差

Figure 7 (Color online) (a) Coupling efficiency of binary blazed gratings; (b) angle tolerance.

图 8 (网络版彩图) (a) 底部带金属铝反射镜的啁啾型光栅的结构示意图; (b) 耦合效率

Figure 8 (Color online) (a) Schematic diagram of chirp grating with the aluminum reflector on the bottom; (b) coupling efficiency.

统中都有较为广泛的应用前景. 光滤波器可以分成如下几类: 基于微环结构, 基于星型耦合器, 基于马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构. 其中基于 MZI 的波导结构最为广泛. 华中科技大学张新亮教授研究小组^[91]2014 年报道了利用硅基集成的梳状滤波器和 AWG 解复用器集成实现波分复用(WDM)系统 8 路信号并行处理. 其中梳状滤波器自由光谱范围(FSR)为 40 GHz.

最近微磁盘和微环因为其高密度集成的应用潜力而日益得到关注^[92,93]. 对于一种常见的基于微环分插滤波器, 光从靠近一个环的波导中穿过, 因为光模式的倏逝场与环重叠, 光能量便转移到环中^[94], 波导与环间的间隔将决定耦合的强度. 比利时 Ghent 大学 Thourhout 教授研究小组^[94]2013 年报道了一个基于硅基双微环共振腔结构的 4 通道的 WDM, 通道间隔 300 GHz, 平均差损小于 1.5 dB, 平均串扰优于 -15 dB, 器件通过硅掺杂形成电阻加热器实现微调 and 补偿. 美国加州大学的 Mookherjea 教授研究小组^[95]利用级联的微环实现高对比度的硅基光滤波器, 实验证明通带、禁带对比度高达 100 dB, 3 dB 带宽在 12–125 GHz 热光可调. 乔治亚理工学院的 Adibi 教授研究小组^[96]在 2012 年利用微碟共振腔在 MZI 结构中替代延时线, 实现 3 dB 带宽在 0.47–4 GHz 热光可调的窄带滤波器.

滤波器通常要求宽的自由光谱区和大的消光比. 此外, 平坦的宽频带, 波形滚降和低损耗也是波分复用系统的目的. 最近, 由 Kotura 的 Dong 等人^[97]和 MIT 的 Smith 小组^[98,99]实现了消光比大于 50 dB、损耗低于 2 dB 滤波器, 以及自由光谱区超过 30 nm 的分插滤波器, 如图 9 所示. 然而, 因为环和波导要在这些滤波器平板结构的相同硅层形成, 这就需要很

精确的制造技术, 这也是大小控制和再生性的重要挑战^[92]. 相比之下, 一组与微环垂直耦合的滤波器已经被证实能够使制造技术得到简化^[92,100]. 图 10 为

图 9 (网络版彩图) (a) 环滤波器的构造的光学镜像图; (b) 三状态滤波器电镜图; (c) 三状态滤波器的响应光谱

Figure 9 (Color online) (a) An optical image of ring filter; (b) SEM picture of three ring filter; (c) response spectra of three ring filter.

图 10 (网络版彩图) 垂直耦合的交叉网格滤波器示意图

Figure 10 (Color online) Schematic diagram of vertical coupling cross mesh filter.

Kokubun^[100]提出使用交叉栅格结构. 与精细刻蚀不同, 垂直分离可以通过良好控制沉积来实现, 从而使得耦合强度可以被更精确的控制. 并且, 由于与场的重叠部分要比横向耦合对补偿更加不敏感, 所以, 这种类型的滤波器可以允许相对较大的横向偏移的制造容差. 另一种流行的滤波器是点阵型的, 使用这种蛇形延迟线, 沟道带宽可以通过这个结构内的周期数目来控制. 更重要的是, 在相同半径下, 它能到到比环形滤波器还要宽的自由光谱区(2.75 倍)^[101,102].

上述介绍的所有滤波器都是相对静态的, 带宽、消光比、自由光谱区等的任何变化只能通过重新设计和制造来完成. 所以, 为适应现代的宽带需求, 就要求滤波器能够实现很好的动态性能^[103], 下面再简单介绍下几个新型滤波器, 一个常见的方法是使用微电机系统. 在零偏压下, 波导完全不耦合. 当电极加上偏压时, 波导弯成微盘状, 这导致了他们间的耦合强度增强, 且随着偏压的升高, 耦合越强. 基于这种机理, 能够实现衰减可调的滤波器^[104], 同样地, 从 2.8–78.4 GHz 带宽可调的滤波器随后也实现了^[105], 且通过使用微镜阵列, 实现了可重构的分插滤波器^[106]. 大约 750000 个微镜能够编址录入数字微镜芯片, 且每一个都能旋转 $\pm 9.2^\circ$, 这决定于应用于存储单元的控制信号. 所以, 器件的动态配置参数可以通过控制被选择的微镜组的倾斜度来获得, 且没有任何光学或机械调整, 最后能取得消光比达 35 dB 的成果, 重配置时间仅微秒量级.

3.4 偏振分束/合束器

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. 偏振分束器是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, 从而实现偏振分束的器件. 偏振分束器根据结构主要分为基于平面光栅^[107]、阵列波导光栅^[108]、光子晶体^[109]、马赫-曾德尔干涉仪^[110]、定向耦合器(DC)^[111,112]、以及多模干涉耦合器型(MMI)偏振分束器^[113–115]. 其中, 基于平面光栅^[107]、阵列波导光栅^[108]和光子晶体^[109]的偏振分束器都需要非常严格的制作精度. 用双刻蚀工艺实现的 MZI 偏振分束器的尺寸较大为 200 μm , 在波长为 1540–1580 nm 消光比保持在 10 dB 以上^[110]. 基于对称结构的定向耦合器型偏振分束器可以做到小尺寸, 但是消光比不高, 并且带宽不大, 如器件尺寸为 7 $\mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 消光比在 C 波段为 10 dB 以上^[111]. 基于非对称型定向耦合器的偏振分束器如采用弯曲波导, 其耦合长度仅为其中一种偏振的拍长, 可以进一步缩短器件尺寸, 整个器件的长度可以小于 10 μm , 同时在消光比大于 10 dB 以上的带宽达到 200 nm^[112]. 多模干涉耦合器型偏振分束器有 3 类结构, 分别为双光子干涉型^[113]、准成像原理^[114]和级联多模干涉结构^[115]. 双光子干涉型尺寸非常紧凑, 只有 13.94 μm , 实现在 50 nm 的带宽内消光比大于 15 dB, 但需要精确控制两根波导之间的角度(7.4°), 对工艺要求非常高^[113]. 为了实现大容差的偏振分束器, 可以采用基于准成像原理的偏振分束器, 尺寸为 8.16 $\mu\text{m} \times 1034 \mu\text{m}$, 实现在 C 波段消光比大于 15 dB, 在宽度容差 150 nm 的范围内消光比达到 20 dB^[114]. 但是以上这些偏振分束器^[108–114]都是以空气为上包层, 不能与标准的 CMOS 工艺兼容. 本研究小组研究了基于级联多模干涉型结构的偏振分束器, 以二氧化硅的上包层解决上述了问题, 而且实现在比较小的尺寸 4 $\mu\text{m} \times 145.27 \mu\text{m}$ 的前提下, 消光比在 20 nm 的带宽内大于 20 dB^[115], 如图 11 所示, 为基于 MMI 的偏振分束器的结构图和消光比 TE, TM 透射谱. 当然硅基偏振分束器遇到的主要问题是, 目前的硅基光电子学主要平台多是基于 220 nm 顶层硅的, TM 模式对 220 nm 厚度非常敏感, 对工艺要求很高, 还需要不断改进工艺, 得到好的分束效果.

图 11 (网络版彩图) 偏振分束器的结构图和 TE, TM 透射谱

Figure 11 (Color online) The structure diagram of PBS and TE, TM transmission spectra.

3.5 光混频器

集成偏振复用正交相移键控(PDM-QPSK)相干光接收技术是光通信领域的研究热点之一, 90° 光混频器是相干光接收端进行相位混频以解调光信号的重要核心器件. 90° 光混频器是一个 6 端口的器件, 在实际应用中, 2 个端口分别输入信号光 S 与本振光 L , 4 个端口分别混频输出 $S+L$ 、 $S-L$ 、 $S+jL$ 和 $S-jL$. 其中由于 $S+L$ 和 $S-L$ 相互正交, $S+jL$ 和 $S-jL$ 相互正交, 所以这两组输出均称为正交输出, 正交输出可经由平衡探测接收后转化为包含已解调信息的电信号.

目前已经报道的波导上实现光混频器方案, 按照器件的类型可概括为 3 大类: 星型耦合器(Star Coupler)类^[116–118]、阵列波导光栅类^[123]和多模干涉耦合器(MMI)类^[120–125]. 其中星型耦合器结构设计较为复杂, 器件的尺寸也较大(毫米量级), 器件的损耗输出端口之间的不平衡都较高. 阵列波导光栅实现混频的优点在于它是多功能的, 可以同时实现 90° 光混频、偏振分束、波分复用或解复用功能, 但是同时阵列波导光栅的结构更为复杂, 且尺寸更大, 文献^[119]中实现的阵列波导光栅自身的损耗为 9.5 dB.

MMI 耦合器是基于自映像效应(Self-Image Effects)原理完成 90° 光混频功能, 光进入多模波导后被分裂为许多模式, 各模式之间相互干涉传播, 在特定的传播长度 L_N^M 和特定的位置会出现一个或多个输入场的映像, 且带有固定的相位关系. 通过对不同 MMI 耦合器固有的不同相位关系进行研究, 直接利用其正交相位输出关系(4×4 MMI 耦合器)或者是经组合后得到正交相位输出关系(多个 MMI 耦合器组合)来实现 90° 混频的功能. 现有的由 MMI 实现的 90° 光混频器也可以大体分为 3 种: 4×4 MMI 耦合器^[120,121]、 2×2 MMI 耦合器组合^[122,123]和 2×4 MMI 耦合器组合^[124–126]. 其中 4×4 MMI 耦合和 2×2 MMI 耦

合器组合存在波导交叉的现象, 带来交叉损耗和信号间的干扰, 影响传输信号的质量, 普通矩形 2×4 MMI 耦合器组合^[124,125]需要额外的相移器的帮助才能完成 90° 光混频功能, 所以这 2 种情况在设计和实现上增加了难度. 楔形 2×4 MMI 耦合器^[126]结构与设计相对简单, 如图 12 所示, 无波导交叉现象从而避免了不必要的串扰, 不需要额外的相移器辅助, 利用该方案作为 90° 光混频器的设计具有很高的性价比. 经过理论上的分析和推导, 硅基楔形 2×4 MMI 不仅可以做到比相应矩形 MMI 尺寸更小, 而且移除了矩形 2×4 MMI 级联结构的 90° 光混频器的结构中的相移器. 此外, 通过在输入端减小宽度, 减少 MMI 中被激发的模式数, 避免了高折射率差材料的 MMI 中高阶模带来的相位偏差. 最后, 从集成角度来说, 这个结构的混频器在与平衡探测器级联时, 不需要交叉波导, 从而减少了额外的损耗和串扰. 图 13 是实验结果, 可以看到楔形的结构 90° 混频器的相位偏差小于 5° , 满足系统的需求.

4 调制器

电光调制器是指通过把电信号加载到光上, 从而改变光载波的特征参数的一种器件. 当评价一个

图 12 (网络版彩图) 楔形 MMI 级联结构的光 90° 混频器示意图

Figure 12 (Color online) Schematic diagram of 90° hybrid based on taper MMI structure.

图 13 (网络版彩图) 楔形 MMI 级联结构的光 90° 混频器的相位偏差

Figure 13 (Color online) Phase deviation of 90° hybrid based on taper MMI structure.

调制器的性能好坏时,一般要考虑以下几种参数:调制深度,也叫消光比,是关于最大传输光强度与最小传输光强度的比例.大的消光比能够获得较低的误码率和高接收灵敏度,特别是对于单通道传输,虽然基于互连的目的最好能有>7 dB 的调制深度,但考虑系统的整体均衡,4–5 dB 通常是足够的^[127];第二个是调制速度,其表征在特定速率下承载数据的能力,描述了调制器传输数据的速率;第三个是带宽,通常指调制减小到最大值的 1/2 时的频率,跟调制速度成正相关关系,也是衡量调制器往光波上加载数据能力的大小,高的带宽将具有更高的数据传输速率.此外,插入损耗、面效率、功耗也是调制器设计时需要考虑的重要内容.

理想的光学调制器是高调制速度、大带宽、低损耗、小尺寸及超低功耗.然而,这些要求通常会互相矛盾.所以,有必要根据不同的目的进行折中优化.目前这个研究领域主要有 2 个分支.有些研究小组仍继续关注 IV 族材料的调制器,而其他一些小组则寻求可以在同一硅平台上使用不同材料组合的方法.

4.1 基于 IV 族材料的调制器

由于硅是中心对称晶体,在 1.3–1.5 μm 的通信波段,包括泡克尔效应、克尔效应、弗朗兹-凯尔迪什(F-K)效应等主要电场效应在纯硅中很微弱^[7,127,128].这使得热光效应和等离子色散效应成了目前在硅上做调制器的可行方法.由于硅的热光系数比较大($1.86 \times 10^{-4}/\text{K}$)^[128],基于温度调节材料折射率的热光调制器已经在硅上实现了.最近,可调热光开关和调制器已经得到报道^[129],而这种类型调制器的功耗与

基于等离子体色散的调制器相当^[128].且热光系数还可以通过在二氧化硅薄膜中使用纳米硅结构的富硅层来进一步提高^[130].然而,虽然 Della Corte 等人^[129]通过优化驱动信号成功地使得热光调制器的反应时间降到大约几微秒量级,但这个速度对于现代通信应用的高频要求还是太慢.

相比之下,等离子色散效应是在硅上做调制器最常见的方法,其折射率,包括实部 n 和虚部 α ,随硅中的载流子浓度变化而改变. Soref^[7]和 Bennett^[128]通过实验得到的吸收曲线评估了折射率的变化,他们推导了在通信波段下定量计算载流子注入和耗尽时的经验公式.在 $\lambda_0=1300 \text{ nm}$ 下,

$$\begin{aligned}\Delta n &= \Delta n_e + \Delta n_h \\ &= -[6.2 \times 10^{-22} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}], \\ \Delta \alpha &= \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h \\ &= 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_e + 4.0 \times 10^{-18} \Delta N_h].\end{aligned}\quad (4)$$

其中 Δn_e , Δn_h 分别是由于电子和空穴载流子浓度变化引起折射率的变化,而 $\Delta \alpha_e$, $\Delta \alpha_h$ 分别是电子和空穴载流子浓度变化引起吸收的变化,同样,在 $\lambda_0=1550 \text{ nm}$ 下,

$$\begin{aligned}\Delta n &= \Delta n_e + \Delta n_h \\ &= -[8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}], \\ \Delta \alpha &= \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h \\ &= 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h].\end{aligned}\quad (5)$$

所以,电子和空穴浓度的增加会降低电折射但会增加电吸收.

把折射率的变化转化成强度调制有 2 种方法.一个常见的方法是通过改变单臂或两臂波导的折射率来改变两个波的相位变化,使得它们要么干涉相长或干涉相消^[131],一般是通过一个 MZI 结构来实现的.另一种方法是使用谐振腔结构.因为折射率的改变也会影响谐振条件,这能使器件在任何给定波长下在谐振和非谐振状态间实现转换^[127,132].与 MZI 调制器相比,环形调制器有更小的尺寸和更高的能效,这是因为 MZI 调制器要求相当长的作用长度,导致更大的插入损耗和功耗.然而,环形调制器的缺点是其带宽很窄,这限制了它的应用,更重要的是,这也导致其对制造工艺容差和温度变化非常灵敏^[127,133],所以当选择调制器类型时需要折中考虑.

根据电压改变载流子浓度的方式可以将硅基调制器分为载流子注入式调制、载流子累积式调制、载

流子耗尽式调制. 载流子注入技术是获得载流子浓度变化最成熟的技术, 其优势是整个波导的参数指标相对比较均匀, 这使得光学模式和调制区域可完全重叠^[135], 可以实现很高的调制效率. 然而, 这种类型调制器的主要问题是由于硅中少子存活时间较长导致其运作速度慢, 但通过减小器件尺寸、优化结构及掺杂浓度, 能够改善性能; 另一个问题是由于相对较大注入电流的要求会导致较大的功耗, 这不可避免地导致温度升高. 很遗憾的是, 由于硅中热光效应的会导致折射率的增大, 但载流子注入却会使折射率减小.

另一种类型调制器是基于载流子积累式的, 它在 2004 年由 Intel 实验证实了第一个单片硅上的调制器这一先驱性突破后得到了快速发展^[8]. 该结构电荷在这个 MOS 电容器的传输可由多子决定, 所以器件速度将不再由硅中少子相对较长的存活时间所限制, 但其决定于器件的 RC 常数, 调制速度比注入式相对较快. 此外, 它的 MOS 电容结构可以自动和传统的 CMOS 工艺兼容. 但此结构调制器由于载流子变化区域与光的重叠面积非常小, 因而调制效率低.

还有一种类型的调制器是载流子耗尽式调制器. 第一个载流子耗尽式硅调制器是由 Gardes 等人^[134]在 2005 年完成的, 其理论带宽 50 GHz, 且演示了传输速率大于 10 Gb/s, 消光比范围大约为 3 dB 到 7 dB 的耗尽式调制器^[18,135,136]. 两年后, Intel 的 Basak 研究小组^[133,137]使用相同结构实现的调制器, 其传输速率高达 40 Gb/s, 带宽为 30 GHz, 然而, 其调制消光比仅有 1 dB^[11]. 2012 年英国 Reed 小组^[138]和 2013 年日本 Baba 小组^[139]分别发表了传输速率达 50 Gb/s 的基于耗尽式的硅基 MZI 调制器和微环调制器, 其中 MZI 调制器的消光比为 3.1 dB, 插入损耗为 7.2 dB,

如图 14 所示为其调制器的截面图, 文中也指出采用行波电极驱动速率可以超过 50 Gb/s. 2013 年中国科学院半导体研究所 Yu 研究小组^[140]的硅基 MZI 和微环调制器分别实现了 60 Gb/s 的传输速率实验, 其 MZI 调制器的器件长度为 0.7 mm, 最大驱动电压约为 6 V, 图 15(a)为其微环调制器示意图及所采用的交错掺杂的 pn 结结构, 他们用该微环调制器实现了 4×50 Gb/s WDM 调制.

除了对传输速率的考虑, 能耗也是硅基调制器研究和发展的方向. 与注入式相比, 耗尽式硅基调制器能达到更高的调制速度, 但是以能耗和调制效率为代价的; 与 MZI 型相比, 微环调制器的能耗要低些. 许多研究组也展开了关于低能耗的研究, 而垂直 pn 结(如图 15(b))是迄今为止调制效率最高的 pn 结构^[141], 与传统侧向 pn 结相比, 能耗可降低一个数量级, 但垂直 pn 结的电学连接的设计存在很大困难, 对于微环形硅基调制器需要新的谐振腔结构的出现.

本研究小组采用了反向 pn 结的耗尽式电光调制结构, 在对硅基调制器的 pn 结、光学结构、电极结构的优化设计的基础上, 研制出硅基干涉型马赫泽德调制器, 实现调制带宽 27 GHz 以上, 调制速率达

图 14 (网络版彩图) 耗尽式硅基 MZI 调制器截面图

Figure 14 (Color online) Cross-section image of silicon depletion MZI modulator.

图 15 (网络版彩图) (a) 环调制器示意图及其采用的交错掺杂的 pn 结; (b) 垂直 pn 结结构的调制器示意图

Figure 15 (Color online) (a) Schematic diagram of ring modulator and cross-doped pn junction; (b) schematic diagram of vertical pn junction modulator.

到 40 Gb/s, 消光比 10 dB; 并实现了相位调制, BPSK 最高调制速率达到 30 Gb/s. 对于 1 mm 的硅基调制器, 在仅 3 V_{pp} 的小电压驱动下, 实现了 10 Gb/s 速率的 BPSK 调制, 功率损耗仅为 0.118 W^[18], 如图 16 所示. 并将其用于强度调制的长距离传输系统, 成功实现无误码传输 80 km, 并与商用的 LiNbO₃ 调制器性能进行了比较, 发现硅基调制器有负啁啾效应, 更适合长距离传输^[19], 如图 17 所示.

另外还有 2 种硅基调制器发展的新想法也被提出. 第 1 个是利用光学吸收来实现调制. 与等离子色散效应的调制器相比, 由于吸收型的硅调制器摆脱了少子寿命的限制, 其表现出更高的调制速度和更

低的能耗. 半导体里的弗朗兹-凯尔迪什(F-K)效应和量子限制斯塔克(QCSE)效应是电场诱导光吸收改变的效应, 相比之下, QCSE 的吸收系数有更大变化^[127]. 在带缺陷的量子阱结构中可以观察到 QCSE 效应, 其载波限制仍允许激子增强和光学吸收. 虽然 QCSE 已经被广泛地应用于高速光调制器, 但大部分仍属于是 III-V 族半导体量子阱结构, 比如砷化镓, 带有铝砷化镓缺陷的砷化铝材料^[142,143]. 然而, 近几年由于 III-V 材料的量子阱结构与 CMOS 工艺兼容也吸引了许多人的兴趣. 很遗憾的是, 由于硅和锗是间接带隙材料, 其吸收系数很低. 不过, 锗与硅不同, 锗有一个有用的直接带隙, 其要比间接带隙能量稍高点, 这

图 16 (网络版彩图) 星座图和眼图 (a) 10 Gb/s, 20 Gb/s, 25 Gb/s; (b) 不同驱动电压 10 Gb/s 速率情况

Figure 16 (Color online) The constellation diagrams and eye diagrams: (a) Different data rates of 10 Gb/s, 20 Gb/s and 25 Gb/s; (b) 10 Gb/s data rate under different driving voltages.

图 17 (网络版彩图) 硅基调制器(a)和 LiNbO₃ 调制器(b)在不同传输距离的眼图和消光比

Figure 17 (Color online) Eye diagram with different modulation rates under back-to-back transmission. Si MZM (a): (A) 4 Gbps; (B) 8 Gbps; (C) 10 Gbps; (D) 12 Gbps. LiNbO₃ (b): (E) 4 Gbps; (F) 8 Gbps; (G) 10 Gbps; (H) 12 Gbps.

使其在 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长附近表现出很强和陡峭的上升. 2012 年有研究组实现了基于 F-K 效应的 GeSi 调制器 3 dB 带宽达 40 GHz, 消光比为 6 dB, 而 V_{pp} 仅为 2.8 V, 能耗约 60 fJ/bit, 如图 18 所示^[144]. Harris 小组于 2013 年发表了在硅上外延生长 Ge/SiGe 量子阱结构实现波导集成的 QCSE 吸收型调制器, 其驱动电压仅为 1 V, 带宽覆盖了整个通信 S 和 C 波段.

由 Rong 等人^[145]报道的另一种想法是在硅光学调制器中实现能量收集. 它与传统的调制器结构有相同的结构, 但工作机理完全不一样. 其输入功率和交叉线都得到很好的设计, 使得硅中基于 2 个光子的光伏特效应的双光子能够被引入. 然而, 这个想法要求光源具有相当强的发射强度以保证双光子吸收能够在调制区域实现, 所以仍能需要进一步提高.

4.2 混合调制器

另一种可供选择的光学调制方法是把有机材料和 III-V 族在硅器件中集成在一块, 这些材料与硅不同, 其表现出很强的二阶非线性电光效应, 如泡克耳效应, 这使得它成为应用于调制的候选方法. 首先介绍下硅有机混合集成, 虽然硅由于它的大折射率能够提供很强的光学限制, 但其要应用于光调制的三阶非线性效应仍然很弱. 相比之下, 聚合物有很强和超快的非线性响应以及很宽的可调光谱, 但它们的折射率相当小(一般 $n=1.4\text{--}2.5$)^[146–149]. 所以, 通过使用硅混合有机材料, 利用各种材料能够实现很优良的调制器. 通常, 在硅上制作有源器件就是用这种方法, 但非线性光学效应被由有机材料和聚合物合成的覆层所替代. 2014 年德国 Koos 研究小组和 MIT 的 Alloatti 研究小组^[150]发表了带宽达 100 GHz 的硅有机调制器, 如图 19(a)所示为其器件示意图, 该器件采用 slot 波导, 电光聚合物覆盖了顶层硅和电极, 并充

图 18 (网络版彩图) (a) F-K 效应的 GeSi 调制器结构; (b) 截面图

Figure 18 (Color online) (a) GeSi modulator structure of F-K effect; (b) cross-section image.

满了 slot 波导. 图 19(b)即为该结构的 RC 等效电路, 文章指出在 100 GHz 的频率下, 与一般调制器不同, RC 常数将不再是限制速率的一个基本因素了. 将很薄的衬底硅当做栅极电极, 在 V_{gate} 电压的作用下, 作为带状负载的顶层硅能带发生弯曲, 如图 19(c)所示, 从而在顶层硅上累积形成良传导电子层. Koos 小组^[151]还将硅有机混合调制器进行了高阶调制的实验, 其采用 16QAM 调制方式实现了 112 Gbit/s 的传输速率.

最近几年, 由于石墨烯的研制成功, 也促进了硅基石墨烯混合调制器的研究. 石墨烯为单层石墨材料, 具有高迁移率($2\times 10^5\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ S}^{-1}$)、高光学透过率、高的力学柔韧性和强度等优良电学和光学特性, 使其激起了众多研究组的研究兴趣, 在纳米集成光学和超高速光电子器件的研制中得到了很好应用. 理论分析基于石墨烯材料的调制器带宽极限能达到 THz, 是未来 THz 调制最有潜力的方案. 但是单层或者双层石墨烯相对有限的光吸收导致无法直接构成石墨烯光调制器, 势必需要通过波导集成来提高光和石墨烯的作用, 而硅波导的损耗小, 对光束束缚能力强等特点成为保证石墨烯调制器高速、宽带、尺寸小的最佳选择. 加州大学伯克利分校 Zhang 研究小组^[152]在 2011 年首次报道了波导集成的硅基石墨烯

图 19 (网络版彩图) (a) 硅基有机调制器结构图; (b) 光场分布及 RC 等效图; (c) 加电压后电荷移动示意图

Figure 19 (Color online) (a) Structure diagram of Si based polymer modulator; (b) optical field distribution and RC equivalent figure; (c) charge moving figure after adding voltage.

电吸收调制器. 其结构如图 20(a)所示, 3 dB 电带宽达 1 GHz, 光带宽为 1.35–1.6 μm , 器件大小仅为 25 μm^2 . 随后 2014 年意大利 CNIT, MIT, Bell 实验室等机构的研究人员共同发表了 TE 模式波导集成的硅基石墨烯光相位调制器^[153], 通过调整偏压可以使得石墨烯吸收足够小而被忽略, 但仍保持较大的折射率变化, 并在微环中实现了相位调制. 最近多层石墨烯嵌入波导实现集成的硅基 MZI 相位调制器也被报道^[154](如图 20(b)), 其大小为 80 μm^2 , 消光比达 31.8 dB, 能耗为 8 fJ/bit, 调制速率预计能够达到 40 Gbit/s.

5 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, 因此硅虽然是间接带隙材料, 也可以制备探测器. 但由于硅的禁带宽度是 1.12 eV, 对 1.1 μm 以上的红外光是透明的. 而硅基光电子学所用波段主要是近红外波段, 因此单质硅不适合做硅基光电子学所需要的红外探测器, 具有良好光响应特性的红外光电探测器也因此成为目前研究的重点. 其中, 锗在红外波段具有高的响应, 同时其制备技术和 CMOS 工

艺兼容, 因而锗硅探测器成为目前最有前景的硅基红外光电探测器. 一般来说, 硅基探测器包括肖特基探测器、III-V 族异质结探测器、锗硅探测器.

5.1 肖特基探测器

在硅中克服这种固有问题的第一种方法是利用肖特基金属硅结构. 与使用传统的 p-n 结不同, 肖特基探测器是利用金属半导体的内光子发射效应. 一般为了增加量子效率, 可利用金属-半导体-金属的结构. 肖特基探测器的优势在于它们的极高开关速度和与标准 CMOS 技术兼容的制造工艺, 但其缺点是由于金属层光通量的泄漏导致低的量子效率.

另外, 还有一些方法可以用来提高硅肖特基探测器的量子效率, 包括使用谐振腔^[155,156]、与电介质波导合并^[157]、透明导电以及表面等离子体极化^[158–160]. 表面等离子体极化是指以光波长在金属-半导体界面上通过 TM 极化表面波形式传输. 它可以看作是金属和电磁波内包括电子振荡的耦合激励. 基于等离子体极化的对称硅肖特基探测器(如图 21(a))^[161]和非对称金属带波导(如图 21(b))^[160,162]都被提出用来探测 1550 nm 的光. 由 Scales 等人^[161]研究的对称结构的性能预计能达到 0.1 A/W 的响应度和 21 nA 的暗电流.

图 20 (网络版彩图) (a) 波导集成硅基石墨烯电吸收调制器; (b) 多层石墨烯波导集成硅基 MZI 相位调制器

Figure 20 (Color online) (a) Waveguide integrated silicon based graphene electro-absorption modulator; (b) waveguide integrated silicon based multilayer graphene MZI phase modulator.

图 21 (网络版彩图) (a) 对称; (b) 非对称表面等离子体肖特基接触探测器示例图

Figure 21 (Color online) (a) Symmetric; (b) asymmetric surface plasmon Schottky contact detector diagram.

2010 年, IBM 提出了一种新型的 MSM 结构^[162]. 他们采用的指状电极能减小器件的电容, 另外通过调节金属电极之间的距离, 可以获得很高的电场强度, 从而有效地收集载流子. 器件的电容是 (10 ± 2) fF, 在 -1.5 V 偏压下, 能很好地工作在 40 Gb/s 的传输系统中. 由于不需要掺杂, 这种 MSM 结构的易于制作, 但是其暗电流偏高、响应度也不高. 但是对于肖特基来说仍然需要为提高响应度做更多的努力.

5.2 III-V 族材料异质探测器

另一个实现通信波长的光探测的解决方法是使用 III-V 族材料. 与硅相比, 基于 III-V 材料的探测器通常有更宽的吸收带宽, 暗电流相当低. 目前 InGaAs 的 PIN 光探测器的工作响应度超过 1 A/W, 且仅有大约几微安暗电流^[163]. 先前, 大部分 III-V 族探测器是在砷化镓等基底上制造, 与 CMOS 工艺不兼容, 最近有人已经通过使用异质集成方法在 SOI 基底上成功制造出高性能的 InGaAs 等探测器^[163,164]. 如图 22 所示是一个垂直结构的 InGaAs 探测器, 其使用苯并环丁烯(benzocyclobutene, BCB)层来支持顶上的探测器^[164]. 波导层刻蚀的阵列光栅被用来实现从硅波导低损耗地垂直耦合到 InGaAs 光电探测器. 如

图 22 阵列光栅实现 SOI 集成波导型探测器示意图

Figure 22 Schematic diagram of AWG waveguide detector based on SOI substrate.

图 23 (网络版彩图) (a) 集成在 SOI 波导上的 InGaAs 探测器的示意图; (b) 器件制作后的照片

Figure 23 (Color online) (a) Schematic diagram of InGaAs detector based on SOI substrate; (b) device picture.

图 23 所示的是 Ghent 大学采用低温 BCB 键合的方法制作的硅基 III-V 族探测器^[165].

该结构综合了 III-V 族探测器的优点. 它的暗电流可以低至 10 pA, 响应度可以达 1.1 A/W, 并且器件对 S, C 和 L 波段都能有很好的响应度. 相比于键合的方法而言, 外延的方法更能从芯片的角度来解决低成本的批量生产的问题. 如图 24 所示的是香港科技大学的研究小组采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)的方法制作的对接耦合的探测器^[166].

从图 24(b)可以看出, 材料生长后, 由于 III-V 族探测器的斜坡的存在, 在波导和探测器之间存在一个 $2 \mu\text{m}$ 的间隙, 光可以从这个间隙中散射出去, 从而降低器件的响应度, 器件的响应度是 $0.17 \text{ A/W}@-1 \text{ V}$. 在 -5 V 偏压下的 3 dB 带宽仅为 9 GHz. 在红外等长波长区域和不同温度下, 基于医学镜像、气体传感、检测设备等商业目的或者应用于军事的高温探测器阵列, 将量子阱和量子点结构应用于 III-V 族探测器来提高性能已经被实现了^[167,168]. 此外 III-V 族材料的双光子行为也被用于低于带隙辐射的低速探测, 且这种器件也在激光产生脉冲时被用作相关器^[169].

5.3 锗硅探测器

锗硅探测器由于其在近红外波段有高响应度、高带宽, 且与 CMOS 工艺兼容等优良的光电特性已经成为近几年的研究热点之一. 锗硅光电探测器的主要挑战是在硅上获得高质量的外延锗膜. 锗的晶格常数比硅大 4.2%, 这种晶格失配会导致在硅上直接外延生长锗产生高密度位错缺陷, 这会引入新的复合中心, 进而影响光电探测器的性能. 尽管存在这个固有问题, 但许多研究小组已经通过成熟的工艺在硅上获得了高质量的锗. 一个常用的方法是使用两步锗生长技术. 与传统使用锗硅缓冲层进行外延生长锗不同的是, 这种方法在硅基上直接生长锗^[170,171].

图 24 (网络版彩图) (a) 对接耦合的外延的 III-V 族的探测器; (b) 材料生长后的扫描电镜照片

Figure 24 (Color online) (a) Butt-coupled epitaxial III-V detector; (b) SEM picture after growth of material.

首先在(320–360)°C 的低温下, 硅上生长一层薄薄的外延锗来抑制锗的岛状生长, 这个锗层的厚度已经足以消除外延生长时晶格失配的影响. 然后在大于 600°C 的更高温度下继续生长能实现更高的生长速率和更好的晶体质量. 两步外延生长的优势是第一步低温时它在锗和硅层产生拉伸应变而不是压缩应变, 这种拉伸应变与锗的能带结构紧密相关. 当加上拉伸应变使直接带隙和间接带隙都会收缩. 但是直接带隙比间接带隙收缩更快. 所以锗通过增加应变能够从间接带隙转变成直接带隙材料, 这会大大提高锗的光电特性^[171]. 此外, 另一种很好的方法是 80 年代发展起来的在硅上选择性地生长锗, 这种方法因为其仅在硅基光电集成电路上指定区域里选择性地生长出高质量的锗渐渐吸引了研究人员的兴趣. 这种方法能够在锗生长阶段前先制造出晶体管^[171,172]. 据报道如果所选择的生长区域小于 40 μm 时用这种方法能够减小错位密度^[172].

锗探测器的设计要有更高的响应度、带宽和更低的暗电流. 锗探测器结构包括垂直入射型和波导型的锗硅 pin 探测器的两种结构. 在垂直入射光电探测器中, 响应度与本征区的光子吸收效率紧密相关. 另外一方面, 光生载流子穿过 pn 结的渡越时间和 RC 常数决定了带宽. 对于暗电流, 它决定于结电容、温度、偏压及晶格缺陷密度. 所以, 很难达到上述的 3 个要求, 需要做出权衡. 如更大的厚度能够更好地实现高量子效率但导致低的带宽和高的暗电流, 因为其增加了二极管的电容. 相比之下, 波导型结构由于其允许可以对量子效率和渡越时间将进行独立优化而更

受大家青睐. 同时, 波导探测器的器件区域要比垂直入射型的还要小 10 倍. 最近, 锗硅光探测已经获得很好的进展. 例如 Vivien 等人^[173]在 1550 nm 下获得 42 GHz 带宽及 1 A/W 灵敏度的波导型锗探测器. 另外, 1.3 μA 低暗电流 32 GHz 带宽和 1.1 A/W 灵敏度的高性能锗探测器也被实现了^[174].

PIN 锗光电二极管被关注的另一点是其与 CMOS 工艺兼容. 一个在 CMOS 电路上制造锗探测器常见的方法使用前端线方法, 其在面板阵列和金属间插入外延锗^[171]. 最近, Luxtera 和 MIT 通过这种技术分别用 130 nm 和 180 nm 的工艺成功地把锗探测器集成到 CMOS 电路上^[18,175]. 除了外延生长问题, 另一个 CMOS 集成的重点是让探测器的偏压尽可能小, 因为这不仅会减小暗电流也会减小吸收功率和芯片工作的偏压要求. 虽然低偏压会减小带宽, 但通过优化 p-i-n 结构的掺杂分布, 探测器在零偏压下工作仍可以获得可接受的带宽^[171]. 目前, Feng 等人^[174]已经展示了一个零偏压工作的锗探测器, 其带宽为 17.5 GHz. 最近几年也有几个零偏压锗探测器得到报道^[176,177]. 2012 年, Vivien 等人^[178]做出了对接耦合的 Ge 波导探测器, 器件在零偏压下很好地工作在 40 Gb/s 的光纤传输系统中. 同年, 新加坡的 IME 采用在 Ge 探测器的侧面和顶端加入 SiN 的方法产生应力, 从而改变 Ge 材料的能带结构, 来增大器件的响应度, 使得探测器在 C 波段和 L 波段的响应度均能达到 0.9 A/W^[179]. 与此同时, 日本东京大学的研究小组采用气相掺杂和 GeO₂ 做钝化的方法, 减小器件的表面和 pn 结内的缺陷数目, Ge 探测器的暗电流密度低至

0.032 mA/cm²^[180]. 2013 年, 新加坡的 IME 报道了用电感耦合的 Ge 探测器, 引入电感结构来改变器件的等效电路, 从而提高 RC 时间常数限制的 3 dB 带宽, 其 3 dB 带宽达到 60 GHz^[181].

本研究小组也对波导结构的硅基 Ge 光探测器的光学和电学结构进行了综合优化设计, 在保障足够响应度的前提下, 尽量降低光生载流子的渡越时间, 减小器件的电容, 从而提高器件的工作速度. 研制出 SOI 衬底上的波导集成的高速 Ge 光电探测器, 器件在 1550 nm 波长下的响应度约为 0.9 A/W, 在 -3.5 V 偏压下的 3 dB 带宽为 22 GHz, 器件能很好地工作在 30 Gb/s 下的背靠背的光纤传输系统中. 图 25 是带宽和 30 Gb/s 的测试眼图.

雪崩光电二极管(APDs)是另一种备受关注的探测器研究热点. 由于在 APDs 内的倍增特性, 其通常表现出要比 p-i-n 型探测器高 5–10 dB 的灵敏度. 与 p-i-n 型探测器相比, APDs 也有更大的增益带宽. 目前, Kang 等人^[182]和 Zaoui 等人^[183]已经在 1310 nm 下分别获得了 340 和 845 GHz 的超大增益带宽的

锗硅 APD. 2010 年也报道了 -30.4 dB 高灵敏度和 10 Gb/s 速度的锗探测器^[184]. 这些性能已经比目前的基于 III-V 族的商用 APDs 还要好. 为了充分利用锗材料的高的吸收系数, 以及硅材料的低的噪声离子化系数的特点, 人们通常采用的是吸收区和倍增区分离(SACM)的结构. 图 26 所示的是硅基锗 APD 以及 SACM 的结构^[185]. 这个器件的响应度高达 22 A/W, 3 dB 带宽高达 20 GHz. 理论上的灵敏度可以达到 -30.5 dBm. 但是这种结构需要很高的偏压(28 V), 器件的暗电流也比较高, 需要进一步的改进.

这些重要工作也为未来低成本、超过 40 Gb/s 速率的基于 CMOS 的锗硅 APD 铺平了道路. 基于高速和优良灵敏度特性的 APD 已经被应用于像 3D 成像、单光子探测等一些领域^[185,186].

6 应用

硅基光电子器件的最先应用平台是在同步光网络和 G 比特以太网中作为收发器, 或者 WDM 器件以

图 25 (网络版彩图) 带宽(a)和 30 Gb/s 的测试眼图(b)
Figure 25 (Color online) Bandwidth (a) and 30 Gb/s eye diagram (b).

图 26 (网络版彩图) (a) 硅基锗 APD 的示意图; (b) 器件的透射电子显微镜照片
Figure 26 (Color online) (a) Schematic diagram of Si based Ge APD; (b) TEM picture of device.

及在光相关传输系统中的收发器件. 图 27 给出了 Intel 公司制备了硅基光电集成模块^[187]. 八路高速 MZI 调制器阵列组成的复用器和解复用器都被集成到同一个 SOI 衬底上, 芯片为测试需要封装了射频连接器和偏振控制器. 这个集成发射机已经表明在单根信号光纤拥有 200 Gb/s 的数据传送容量. Bell 实验室则利用硅基光电子技术首先在片上实现 112 Gb/s 的偏振复用 QPSK 调制格式的光收发机^[14,188]. 如图 28 所示, 其每路调制器速率达到 28 Gb/s, 且与 PR, PBC 等均集成在单片上, 并在 2013 年报道进行了 2560 km 的传输实验^[189], 取得了良好效果. 随后 Bell 实验室又实现了 224 Gb/s 的 PDM-16-QAM 调制格式的光收发机^[190]. 这些都有效证实了硅光电子集成回路在高速相干光传输系统应用的巨大潜力.

硅基光电子学的另一个重要应用是芯片间/片上的光互连. 电连接中电阻及频率选择性的信号衰减等固有问题已经导致处理器出现瓶颈. 所以, 这限制了处理器的速度. 另一个铜线互连的问题在于其较大的功率损耗, 研究发现由于信号间的寄生电容的充放电, 多核工作时互连占据了大部分的功率损耗^[191].

图 27 (网络版彩图) Intel 公司的硅基光电集成模块
Figure 27 (Color online) Si photonics module from Intel.

图 28 (网络版彩图) (a) 112 Gb/s PDM-QPSK 发射机模块;
(b) 112 Gb/s 接收机模块

Figure 28 (Color online) (a) 112 Gb/s PDM-QPSK module from Bell lab; (b) 112 Gb/s receiver module.

相比之下, 光互连没有电阻和电容损耗, 这就大大提高了系统的能效. 此外, 光信号有更好的信号完整性, 允许其短脉冲在相当长距离传输而没有展宽. 这能够提高工作速度和简化互连系统. 与铜互连相比, 光波导因为其交叉部分决定于光波长而存在尺寸的劣势. Intel 公司推出他们先进的电路和集成技术的项目, 在芯片到芯片通信时用光互连来替代电互连, 带宽预计达到 200 Gb/s 到 1 Tb/s^[192]. 这些年提出纳米光电子的三维集成是用来提高硅基光电子性能的很好方法^[193], 并在存储器及硬盘研制上得到很好应用. 在日本内阁科学技术委员会所支持的 30 个世界领先科学技术计划的资金项目中, 光电子聚合系统技术项目(Photonics and Electronics Convergence System Technology, PECST)从 2010 年就已经开始, 并且 PECST 项目的目标就是建立起 10 Tb/s/cm² 带宽密度的片间互连. 如图 29 所示即是其 2022 年可能实现的片上服务器(On-Chip Server)^[194], 其结构包含众核(超过 16 个)CPU, 3D 存储器、3D 固态硬盘, 这些元件均集成在硅光插入器(Silicon Optical Interposer)上, 能够支持元件间以 Tbit/s 进行光互连. 由于光信号的特性, 其带宽容量很高, 并且不用担心光耦合、反射、偏振依赖性等. 图 30 所示即是其中一个片内互连的具体图示^[195], 可以看出插入器上的激光器、光调制器及探测器阵列等形成大规模集成器件(Large Scale Integration, LSI), 且它们都是通过硅上的光波导直接互连. 与传统 PCB 上电子线路相比, 在硅上实现这种光连接可以使尺寸减小 100 倍^[194].

硅基光电子也可以应用到传感领域, 目前传感已

图 29 (网络版彩图) 片上服务器

Figure 29 (Color online) On-chip server.

图 30 (网络版彩图) 插入器上大规模集成器件图

Figure 30 (Color online) Mounting LSIs on an interposer.

经成为一个很热门的发展领域. 比如生物医学^[196–198], 气体^[199], 倏逝波或光学领域^[200,201]等都得到了很好的发展. 图 31(a)是 SOI 倏逝波传感应用于 DNA 分子传感的例子^[198]. 波导模式的电场区域有一部分倏逝场延伸到芯层的外边, 其与上述的分子相互作用, 使得底下波导的有效折射率发生改变, 所改变的大小取决于所吸收分子的大小浓度. 通过测试在硅波导光传输的相位, 可以实现传感. 图 31(b)是基于相同机理的无标记分子探测的一个硅基光电子线阵列^[196]. 不同的是, 这个阵列使用 MZI 将感应的有效折射率改变量转换为可测量的强度改变.

硅太阳能电池由于其转换效率比较高、性能稳定、原材料丰富等优点成为当今光伏产业中的重要支柱. 目前的硅基太阳能电池主要分为 3 类: 单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池和非晶硅/微晶硅薄膜太阳能电池.

单晶硅太阳能电池采用高纯的单晶硅为原料, 具有光电转换效率高的优点. 日本松下公司研制的 HIT 系列硅太阳能电池在 2014 年再一次刷新了单晶硅太阳能电池转换效率的记录, 达 25.6%, 接近理论值, 成为目前世界上转换效率最高的硅基太阳能电池⁵⁾. 其采用的结构和核心技术如图 32 所示, 通过在单晶衬底上层压高质量非晶硅来减小载流子复合损

失、将电极置于背面使光更有效到达衬底来降低光损失、采用栅格电极并置于受光的背面来降低电阻损耗等措施来提高光电转换效率. 但是, 这种太阳能电池的生产需要消耗大量的高纯硅材料, 而制造这些材料工艺较复杂, 成本较高.

多晶硅太阳能电池与单晶硅太阳能电池相比具有成本低的优势, 但其光电转化效率相对较低. 德国夫琅禾费(Fraunhofer)太阳能研究所制备的多晶硅太阳能电池转化效率为 20.3%^[202]. 这种电池不仅具有局部背表面场结构和用等离子体掩模法制备的表面结构, 光学和电学性能良好, 而且由于它采用了湿法氧化法钝化电池后表面, 在钝化效果和温度因素之间找到了一个合适的平衡点, 既保证了钝化效果, 有减少了温度对少子寿命的影响, 使电池的性能得到最优化.

图 31 (网络版彩图) (a)基于倏逝场 SOI 波导传感器横截面; (b)硅基光电子线阵列传感器的俯视图

Figure 31 (Color online) (a) Cross-section of SOI waveguide-based evanescent field sensor; (b) top view of silicon photonics wire array sensor.

5) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2014/04/en140410-4/en140410-4.html>

硅基薄膜太阳能电池主要包括非晶硅和微晶硅薄膜等以硅为主要材料的薄膜类太阳能电池. 非晶硅薄膜太阳能电池是一种以非晶硅化合物为基本组成的薄膜太阳能电池, 易于大面积化生产, 成本较低. 但是其非晶硅缺陷较多, 电池效率偏低, 并且还存在衰退效应(Staebler-Wronski 效应, SW 效应). 微晶硅与非晶硅相比, 具有更好的结构有序性, 用微晶硅制备的太阳能电池几乎没有衰退效应, 载流子迁移率相对较高. 目前有研究组在微晶硅薄膜太阳能电池表面引入六角浅凹周期纹理结构(如图 33)降低反射, 并在研究其周期与太阳能电池厚度关系的基础上进行优化设计, 进而提高转换效率^[203].

7 硅基光电子学未来发展方向和目前面临的主要挑战

尽管硅基光电子学在最近几年取得了诸多成绩,

如 III-V 键合激光器, 电泵锗激光器, 60 Gb/s 的硅基调制器和锗探测器, 低损耗的硅基波导和高耦合效率的光栅, 以及 100 Gb/s 传输速率的硅基光电子集成芯片, 但仍然面临一些问题和挑战.

在硅基有源器件方面: 通信波段、电泵浦、产品化的硅基光源仍然面临挑战, 包括低阈值的 III-V 键合光源, 稳定的、低电压驱动的锗激光器, 基于 Er 离子的电泵硅基激光器; 调制器在综合指标上还需要不断的努力使其能够真正满足系统的实际需求; 如高消光比、高线性度等指标. 锗探测器的暗电流仍然是一个制约其发展和大规模产业化的一个重要参数. 需要开发新的工艺使器件的暗电流降低.

在硅基无源器件方面: 目前低损耗的的硅基波导还需要特殊的工艺处理, 不能和大规模集成电路的工艺兼容, 也是要解决的问题; 高耦合效率的光栅大多还要增加多个反射层, 这使工艺变得复杂; 另外高消光比的偏振分束器和隔离器, 以及宽自由光谱

图 32 (网络版彩图) HIT 硅太阳能电池的结构及核心技术

Figure 32 (Color online) The structure and core technology of HIT silicon solar cell.

图 33 (a) 衬底表面; (b) 太阳能电池表面的六角浅凹周期纹理结构

Figure 33 The hexagonal dimple periodical texturing structure of (a) the substrate surface, (b) the cell surface.

区和大的消光比的滤波器也还有很多优化的空间. 这些器件都需要简化工艺, 使其能用标准的 CMOS 工艺制备.

在硅基光电集成方面: 光纤和波导的高效耦合封装一直是个难题; 硅基光电子学器件的设计软件多种多样, 各自不统一, 因此需要进行标准化的努力, 硅基光电子的 SOI 平台的成本依然很高, 和硅基 CMOS 电路单片融合还需要降低 SOI 的成本, 以及进行光、电单片集成的平台研发.

此外, 硅的热光系数较大, 光学性能受温度影响明显, 在器件设计上必须加以克服. 硅基光电子集成的封装也一直是人们忽视的问题, 特别是高速器件的封装仍然面临挑战. 因此, 为了实现硅基光电子集成器件的大规模生产, 需要在材料、机理、工艺和设计上开展攻关研究, 来突破上述科学挑战和技术问题.

预计未来的主要方向包括: 高速, 高带宽, 低能耗的调制器, 探测器的设计; 高能量转换效率的硅基激光器阵列; 单片硅基光电子集成技术(包括驱动, 放大等电子器件和光子器件集成); 光电接口所需的高速电信号处理; 片上光网络的架构与实现; 高速光电子集成芯片的封装; 大规模集成工艺和设备的研

制与开发.

8 总结

硅基光电子学由于其和 CMOS 工艺兼容, 价格低廉的优势, 以及在光通信、光互连、光传感、太阳能电池等领域的巨大应用价值, 已经成为一项革命性的技术. 本文从硅基光电子学的基本器件出发, 介绍了各个关键器件最近 5 年的最新成果, 以及面临的主要瓶颈. 在各个器件研制成功的基础上, 重点介绍了最近 2 年国际上关于系统集成应用方面的重大成果, 最后提出硅基光电子学未来发展方向和目前面临的主要挑战. 尽管硅基光电子学还有些亟待解决的问题, 如硅基光源等, 但这些问题并不影响硅基光电子学大的发展趋势, 如目前可以用键合光源等作为替代技术. 应该来讲, 硅基光电子学产业化的核心技术都已经得以解决, 硅基光电子学的时代已经到来. 这项 21 世纪创造性的新型芯片新技术, 必将为人类信息社会的产业革命带来又一轮重大的飞跃. 最后, 硅基光电子学的发展还需要政府和企业的积极投资, 做到良性循环, 才能取得更大的发展.

参考文献

- 1 Krishnamoorthy A V, Ho R, Zheng X Z, et al. Computer systems based on silicon photonic interconnects. *IEEE*, 2009, 97(7): 1337–1361
- 2 Soref R. The past, present, and future of silicon photonics. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12: 1678–1687
- 3 Kimerling L C, Ahn D, Apsel A B, et al. Electronic-photonics integrated circuits on the CMOS platform. *SPIE*, 2006, 6125: 612502
- 4 Arakawa Y, Nakamura T, Nakamura T, et al. Silicon photonics for next generation system integration platform. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 72–77
- 5 Charbonnier B, Menezo S, O'Brien P, et al. Silicon Photonics for next generation FDM/FDMA PON. *J Opt Commun Networking*, 2012, 4: A29–A37
- 6 Soref R, Lorenzo J P. Single-crystal silicon: a new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical components. *Electron Lett*, 1985, 21: 953–954
- 7 Soref R, Bennett B R. Electrooptical effects in silicon. *IEEE J Quantum Elect*, 1987, 23: 123–129
- 8 Liu A, Jones R, Liao L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor. *Nature*, 2004, 427: 615–618
- 9 Rong H, Jones R, Liu A, et al. A continuous-wave Raman silicon laser. *Nature*, 2005, 433: 725–728
- 10 Koch B R, Fang A W, Chang H H, et al. A 40 GHz mode locked silicon evanescent laser. In: 4th International Conference on Group IV Photonics. Tokyo, 2007. 1–3
- 11 Liao L, Liu A, Rubin D, et al. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications. *Electron Lett*, 2007, 43: 1196–1197
- 12 Narasimha A, Analui B, Liang Y, et al. A fully integrated 4×10 Gb/s DWDM optoelectronic transceiver in a standard 0.13 μm CMOS SOI process. *IEEE J Solid-St Circ*, 2007, 42: 2736–2744
- 13 Doerr C R, Buhl L L, Baeyens Y, et al. Packaged monolithic silicon 112 Gb/s coherent receiver. *IEEE Photon Tech Lett*, 2011, 23: 762–764

- 14 Dong P, Xie C J, Chen L, et al. 112 Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon. *Opt Express*, 2012, 20: B624–B629
- 15 Assafa S, Shank S, Green W, et al. A 90 nm CMOS integrated nano-photonics technology for 25 Gbps WDM optical communications applications. In: *Proceedings of Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, 2012. 33
- 16 Xiao X, Xu H, Li X, et al. High-speed, low-loss silicon Mach-Zehnder modulators with doping optimization. *Opt Express*, 2013, 21: 4116–4125
- 17 Xue C, Xue H, Cheng B, et al. Ge-on-SOI PIN photodetector array for parallel optical interconnects. *J Lightwave Technol*, 2009, 27: 5687–5689
- 18 Yi H, Long Q, Tan W, et al. Demonstration of low power penalty of silicon Mach-Zehnder modulator in long-haul transmission. *Opt Express*, 2012, 20: 27562–27568
- 19 Li T, Zhang J, Yi H, et al. Low-voltage, high speed, compact silicon modulator for BPSK modulation. *Opt Express*, 2013, 21: 23410–23415
- 20 Pavesi L. Silicon-based light sources for silicon integrated circuits. *Adv Opt Technol*, 2008, 2: 416926
- 21 Chanham L T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Appl Phys Lett*, 1990, 57: 1046
- 22 Chok S, Park N M, Kim T Y, et al. High efficiency visible electroluminescence from silicon nanocrystals embedded in silicon nitride using a transparent doping layer. *Appl Phys Lett*, 2005, 76: 071909
- 23 Toshiaki K, Fujii M, Mayashi S, et al. Enhanced optical properties of Si nanocrystal in planar microcavity. *Phys E*, 2003, 17: 451–452
- 24 Kik P G, Polman A. Gain limiting processes in Er-doped Si nanocrystal waveguides in SiO₂. *J Appl Phys*, 2002, 91: 534–536
- 25 Lee J, Shin J H, Park N. Optical gain at 1.5 μm in nanocrystal Si-sensitized Er-doped silica waveguide using top-pumping 470 nm LEDs. *J Lightwave Technol*, 23: 19–25
- 26 Toccafondo V, Pasquale F D, Faralli S, et al. Study of an efficient longitudinal multimode pumping scheme for Si-nc sensitized EDWAs. *Opt Express*, 2007, 15: 14907–14913
- 27 Isshiki H, Dood M J A de, Kimura T. Self-assembled infrared-luminescent Er-Si-O crystallites on silicon. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 4343–4345
- 28 Savio R L, Miritello M, Piro A M, et al. The influence of stoichiometry on the structural stability and on the optical emission of erbium silicate thin films. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 021919
- 29 Wang X J, Kimura T, Zhou Z. Enhanced Er³⁺ luminescence of Er Silicate by Y and Yb co-doping. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Group IV Photonics*, San Francisco, 2009, WD7: 69–71
- 30 Zheng J, Zuo Y, Zhang L Z, et al. Role of Bi³⁺ ions for Er³⁺ ions efficient 1.54 μm light emission in Er/Bi codoped SiO₂ thin film prepared by sol-gel method. *J Lumine*, 2010, 130: 1760–1763
- 31 Wang X J, Nakajima T, Kimura T. Fabrication and characterization of Er silicates on SiO₂/Si substrates. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 041906
- 32 Wang X J, Wang B, Wang L, et al. Extraordinary infrared photoluminescence efficiency of Er_{0.1}Yb_{1.9}SiO₅ films on SiO₂/Si substrates. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 071903
- 33 Han H S, Seo S Y, Shin J H, et al. Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon-rich silicon oxide waveguide amplifier. *Appl Phys Lett*, 2002, 81: 3720–3722
- 34 Kanjilal A, Rebohle L, Skorupa W, et al. Correlation between the microstructure and electroluminescence properties of Er-doped metal-oxide semiconductor structures. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 101916
- 35 Jambois O, Berencen Y, Hijazi K, et al. Current transport and electroluminescence mechanisms in thin SiO₂ films containing Si nanocluster-sensitized erbium ions. *J Appl Phys*, 2009, 106: 063526
- 36 Jambois O, Gourbilleau F, Kenyon A J, et al. Towards population inversion of electrically pumped Er ions sensitized by Si nanoclusters. *Opt Express*, 2010, 18: 2230–2235
- 37 Suh K, Shin J H, Seo S J, et al. Er³⁺ Luminescence and cooperative upconversion in Er_xY_{2-x}SiO₅ nanocrystal aggregates fabricated using Si nanowires. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 121910
- 38 Suh K, Lee M, Soo C J, et al. Cooperative upconversion and optical gain in ion-beam sputter-deposited Er_xY_{2-x}SiO₅ waveguides. *Opt Express*, 2010, 18: 7724–7729
- 39 Wang X J, Yuan G, Isshiki H, et al. Photoluminescence enhancement and high gain amplification of Er_xY_{2-x}SiO₅ waveguide. *J Appl Phys*, 2010, 108: 013506
- 40 Guo R M, Wang X J, Zang K, et al. Optical amplification in Er/Yb silicate strip loaded waveguide. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 161115

- 41 Yin Y, Sun K, Xu W J, et al. 1.53 μm photo and electroluminescence from Er^{3+} in erbium silicate. *J Phys-Condensed Matter*, 2009, 21: 012204
- 42 Yin Y, Xu W J, Wei F, et al. Room Temperature Er^{3+} 1.54 μm electroluminescence from Si-rich erbium silicate deposited by magnetron sputtering. *J Phys D-Appl Phys*, 2010, 43: 335102
- 43 Wang B, Guo R M, Wang X J, et al. Near-infrared electroluminescence in ErYb silicate based light-emitting device. *Opt Mater*, 2012, 34: 1371–1374
- 44 Wang L, Guo R M, Wang B, et al. Hybrid Si_3N_4 - Er/Yb silicate waveguides for amplifier application. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24: 900–902
- 45 Shin J H, Lee M. Reducing optical losses and energy-transfer upconversion in $\text{Er}_x\text{Y}_{2-x}\text{SiO}_5$ waveguides. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25: 1801–1804
- 46 Yin L, Ning H, Turkdogan S, et al. Long lifetime, high density single-crystal erbium compound nanowires as a high optical gain material. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 241905
- 47 Boyraz O, Jalali B. Demonstration of a silicon Raman laser. *Opt Express*, 2004, 12: 5269–5273
- 48 Boyraz O, Jalali B. Demonstration of directly modulated silicon Raman laser. *Opt Express*, 2005, 13: 796–800
- 49 Rong H, Xu S, Kuo Y H, et al. Low-threshold continuouswave Raman silicon laser. *Nat Photon*, 2007, 1: 232–237
- 50 Jalali B, Raghunathan V, Shori R, et al. Prospects for silicon mid-IR Raman lasers. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12: 1618–1626
- 51 Liu X, Osgood R M, Vlasov Y A, et al. Mid-infrared optical parametric amplifier using silicon nanophotonic waveguides. *Nat Photon*, 2010, 4: 557–560
- 52 Zlatanovic S, Park J S, Moro S, et al. Mid-infrared wavelength conversion in silicon waveguides using ultracompact telecom-band-derived pump source. *Nat Photon*, 2010, 4: 561–564
- 53 Jalali B. Silicon photonics: nonlinear optics in the midinfrared. *Nat Photon*, 2010, 4: 506–508
- 54 Liu J, Sun X, Pan D, et al. Tensile-strained, n-type Ge as a gain medium for monolithic laser integration on Si. *Opt Express*, 2007, 15: 11272–11277
- 55 Ishikawa Y, Wada K, Cannon D D, et al. Strain-induced band gap shrinkage in Ge grown on Si substrate. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 2044–2046
- 56 Liu J, Cannon D D, Wada K, et al. Silicidation-induced band gap shrinkage in Ge epitaxial films on Si. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 660–662
- 57 Cheng S L, Shambat G, Lu J, et al. Characterizations of direct band gap photoluminescence and electroluminescence from epi-Ge on Si. *ECS Trans*, 2010, 33: 545–554
- 58 Sun X, Liu J, Kimerling L C, et al. Toward a germanium laser for integrated silicon photonics. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2010, 16: 124–131
- 59 Sun X, Liu J, Kimerling L C, et al. Direct gap photoluminescence of n-type tensile-strained Ge-on-Si. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 011911
- 60 Liu J, Sun X, Camacho-Aguilera R, et al. Ge-on-Si laser operating at room temperature. *Opt Lett*, 2010, 35: 679–681
- 61 Rodolfo E, Cai Y, Patel N, et al. An electrically pumped germanium laser. *Opt Express*, 2012, 20: 11316–11320
- 62 Liang D, Bowers J E, Oakley D C, et al. High-quality 150 mm InP-to-silicon epitaxial transfer for silicon photonic integrated circuits. *Electrochem Solid-State Lett*, 2009, 12: H101–H104
- 63 Liang D, Bowers J E. Highly efficient vertical outgassing channels for low-temperature InP-to-silicon direct wafer bonding on the silicon-on-insulator substrate. *J Vac Sci Technol B*, 2008, 26: 1560–1568
- 64 Roelkens G, Thourhout D Van, Baets R, et al. Laser emission and photodetection in an InP/InGaAsP layer integrated on and coupled to a Silicon-on-Insulator waveguide circuit. *Opt Express*, 2006, 14: 8154–8159
- 65 Campenhout J Van, Liu L, Romeo P Rojo, et al. A compact SOI-integrated multiwavelength laser source based on cascaded InP microdisks. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20: 1345–1347
- 66 Roelkens G, Liu L, Liang D, et al. III-V/silicon photonics for on-chip and intra-chip optical interconnects. *Laser Photon Rev*, 2010, 4: 751–779
- 67 Ohira K, Kobayashi K, Iizuka N, et al. On-chip optical interconnection by using integrated III-V laser diode and photodetector with silicon waveguide. *Opt Express*, 2010, 18: 15440–15447
- 68 Groenert M E, Leitz C W, Pitera A J, et al. Monolithic integration of room-temperature cw GaAs/AlGaAs lasers on Si substrates via relaxed graded GeSi buffer layers. *J Appl Phys*, 2003, 93: 362–367

- 69 Mi Z, Bhattacharya P, Yang J, et al. Roomtemperature self-organised in 0.5Ga0.5As quantum dot laser on silicon. *Electron Lett*, 2005, 41: 742–744
- 70 Chen R, Tran T T D, Ng K W, et al. Nanolasers grown on Silicon. *Nat Photonics*, 2011, 5: 170–175
- 71 Gao F, Wang Y, Cao G, et al. Reduction of sidewall roughness in silicon-on-insulator rib waveguides. *Appl Surf Sci*, 2006, 252: 5071–5075
- 72 Deri R J, Kapon E. Low-loss III-V semiconductor optical waveguides. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27: 626–640
- 73 Yap K P, Delage A, Lapointe J, et al. Correlation of scattering Loss, sidewall roughness and waveguide width in silicon-on-insulator (SOI) ridge waveguides. *J Lightwave Technol*, 2009, 27: 3999–4008
- 74 Takahashi J I, Tsuchizawa T, Watanabe T, et al. Oxidation-induced improvement in the sidewall morphology and cross-sectional profile of silicon wire waveguides. *J Vac Sci Technol B*, 2004, 22: 2522–2525
- 75 Gao F, Wang Y, Cao G, et al. Improvement of sidewall surface roughness in silicon-on-insulator rib waveguides. *Appl Phys B-Lasers Opt*, 2005, 81: 691–694
- 76 Lee M C M, Wu M C. Thermal annealing in Hydrogen for 3-D profile transformation on silicon-oninsulator and sidewall roughness reduction. *J Microelectromech S*, 2006, 15: 338–343
- 77 Borselli M, Johnson T J, Michael C P, et al. Surface encapsulation for low-loss silicon photonics. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 131117
- 78 Gao F, Wang Y, Cao G, et al. Reduction of sidewall roughness in silicon-on-insulator rib waveguides. *Appl Surf Sci*, 2006, 252: 5071–5075
- 79 Xia Q, Murphy P F, Gao H, et al. Ultrafast and selective reduction of sidewall roughness in silicon waveguides using self-perfection by liquefaction. *Nanotechnology*, 2009, 20: 345302
- 80 Huang Y, Luo X, J Song, et al. Low loss (<0.2 dB per transition) CMOS compatible multi-layer Si₃N₄-on-SOI platform with thermal-optics device integration for silicon photonics. In: *Optical Fiber Communication Conference*, San Francisco, 2014, Th1A-1
- 81 Taillaert D, W Bogaerts, Bienstman P, et al. An out-ofplane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38: 949–955
- 82 Taillaert D, Laere F Van, Ayre M, et al. Grating couplers forcoupling between optical fibers and nanophotonic waveguides. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45: 6071–6077
- 83 Chen X, Li C, Tsang H K. Two dimensional silicon waveguide chirped grating couplers for vertical optical fibers. *Opt Commun*, 2010, 283: 2146–2149
- 84 Alonso-Ramos C, Ortega-Moñux A, Molina-Fernández I, et al. Efficient fiber to-chip grating coupler formicrometric SOI rib waveguides. *Opt Express*, 2010, 18: 15189–15200
- 85 Gunn G. CMOS Photonics for high-speed interconnects. *IEEE Micro*, 2006, 26: 58–66
- 86 Yang J, Zhou Z, Jia H, et al. A compact double-layer subwavelength binary blazed grating 1×4 splitter based on silicon-on-insulator. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2614–2617
- 87 Feng J, Zhou Z. Polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler. *Opt Lett*, 2007, 32: 1662–1665
- 88 Zaoui W S, Kunze A, Vogel W, et al. Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits. *Opt Express*, 2014, 22: 1277–1286
- 89 Trinh P D, Yegnanarayanan S, Coppinger F, et al. Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelengthmulti/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9: 940–942
- 90 Suzuki S, Sumida S, Inoue Y, et al. Polarisation-insensitive arrayed-waveguide gratings using dopant-rich silica-based glass with thermal expansion adjusted to Si substrate. *Electron Lett*, 1997, 33: 1173–1174
- 91 Xiang L, Yu Y, Gao D, et al. Silicon based integrated comb filter and demultiplexer for simultaneous WDM signal processing. *IEEE J Sel Top Quant*, 2014, 20: 8200208
- 92 Vahala K J. Optical microcavities. *Nature*, 2003, 424: 839–846
- 93 Daldosso N, Pavesi L. Nanosilicon photonics. *Laser Photon Rev*, 2009, 3: 508–534
- 94 Peter H D, Jeroen D C, Peter V, et al. Fabrication-tolerant four-channel wavelength-division-multiplexing filter based on collectively tuned Si microrings. *J Lightwave Technol*, 2013, 31: 3085–3092
- 95 Ong J R, Kumar R, Mookherjea S. Ultra-high-contrast and tunable-bandwidth filter using cascaded high-order silicon microring filters. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25: 1543–1546
- 96 Li Q, Eftekhari A A, Alipour P, et al. Low-loss microdisk-based delay lines for narrowband optical filters. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012,

24: 1276–1278

- 97 Dong P, Feng N N, Feng D, et al. GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators. *Opt Express*, 2010, 18: 23784–23789
- 98 Popović M A, Barwicz T, Watts M R, et al. Multistage high-order microring-resonator add-drop filters. *Opt Lett*, 2006, 31: 2571–2573
- 99 Xiao S, Khan M H, Shen H, et al. Silicon-on-insulator microring add-drop filters with free spectral ranges over 30 nm. *J Lightwave Technol*, 2008, 26: 228–236
- 100 Kokubun Y. Vertically coupled microring resonator filter for integrated add/drop node. *IEICE Trans Electron*, 2005, E88-C: 349–361
- 101 Yamada K, Shoji T, Tsuchizawa T, et al. Silicon-wire-based ultrasmall lattice filters with wide free spectral ranges. *Opt Lett*, 2003, 28: 1663–1664
- 102 Tsuchizawa T, Yamada K, Fukuda H, et al. Microphotonic devices based on silicon microfabrication technology. *IEEE J Sel Top Quant*, 2005, 11: 232–240
- 103 Poon A W, Li C, Ning M A, et al. Photonics filters, switches and subsystems for next-generation optical networks. *HKIE Trans*, 2004, 11: 60–67
- 104 Lee M C M, Wu M C. MEMS-actuated microdisk resonators with variable power coupling ratios. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17: 1034–1036
- 105 Yao J, Wu M C. Bandwidth-tunable add-drop filters based on micro-electro-mechanical-system actuated silicon microtoroidal resonators. *Opt Lett*, 2009, 34: 2557–2559
- 106 Knapczyk M T, Peralta L G de, Bernussi A A, et al. Reconfigurable add-drop optical filter based on arrays of digital micromirrors. *J Lightwave Technol*, 2008, 26: 237–242
- 107 Tang Y, Dai D, He S. Proposal for a grating waveguide serving as both a polarization splitter and an efficient coupler for silicon-on-insulator nanophotonic circuits. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21: 242–244
- 108 Ye W, Xu D, Janz S, et al. Passive broadband silicon-on-insulator polarization splitter. *Opt Lett*, 2007, 32: 1492–1494
- 109 Saidani N, Belhadj W, AbdelMalek F, et al. Detailed investigation of self-imaging in multimode photonic crystal waveguides for applications in power and polarization beam splitters. *Opt Commun*, 2012, 285: 3487–3492
- 110 Dai D, Wang Z, Peters J, et al. Compact polarization beam splitter using an asymmetrical mach-zehnder interferometer based on silicon-on-insulator waveguides. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24: 673–675
- 111 Fukuda H, Yamada K, Tsuchizawa T, et al. Ultrasmall polarization splitter based on silicon wire waveguides. *Opt Express*, 2006, 14: 12401–12408
- 112 Dai D, Bauters J, Bowers J E. Passive technologies for future large-scale photonic integrated circuits on silicon: polarization handling, light non-reciprocity and loss reduction. *Light-Sci Appl*, 2012, 1: 1–12
- 113 Hosseini A, Rahimi S, Xu X, et al. Ultracompact and fabrication-tolerant integrated polarization splitter. *Opt Lett*, 2011, 36: 4047–4049
- 114 Huang Y, Zhao T, Yi H, et al. High extinction ratio polarization beam splitter with multimode interference coupler on SOI. *Opt Commun*, 2013, 307: 46–49
- 115 Yin M, Huang Y, Yi H, et al. A compact polarization beam splitter based on silicon-on-insulator Asia communications and photonics conference. In: *Proceedings of Asia Communications and Photonics*, Beijing, 2013. AF2B-9
- 116 Doerr C R, Gill D M, Gnauck A H, et al. Monolithic demodulator for 40 Gb/s DQPSK using a star coupler. *J Lightwave Technol*, 2006, 24: 171–174
- 117 Doerr C R, Zhang L, Chandrasekhar S, et al. Monolithic DQPSK receiver in InP with low polarization sensitivity. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19: 1765–1767
- 118 Dragone C. Efficient N×N star coupler based on Fourier optics. *Electron Lett*, 1988, 24: 942–944
- 119 Doerr C R, Zhang L, Winzer P J. Monolithic InP multiwavelength coherent receiver using a chirped arrayed waveguide grating. *J Lightwave Technol*, 2011, 29: 536–541
- 120 Zimmermann L, Voigt K, Winzer G, et al. C-band optical 90-hybrids based on silicon-on-insulator 4×4 waveguide couplers. *IEEE Photon Technol Lett*, 2009, 21: 143–145
- 121 Halir R, Roelkens G, Ortega-Monux A, et al. High-performance 90° hybrid based on a silicon-on-insulator multimode interference coupler. *Opt Lett*, 2011, 36: 178–180
- 122 Kunkel R, Bach H-G, Hoffmann D, et al. First monolithic InP-based 90° hybrid OEIC comprising balanced detectors for 100 GE coherent frontends. In: *Proceedings of IEEE Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, Newport Beach, 2009, TuB2. 2: 167–170

- 123 Sakamaki Y, Nasu Y, Hashimoto T, et al. Reduction of phase-difference deviation in 90° optical hybrid over wide wavelength range. *IEICE Electronics Express*, 2010, 7: 216–221
- 124 Jeong S-H, Morito K. Novel optical 90 hybrid consisting of a paired interference based 2×4 MMI coupler, a phase shifter and a 2×2 MMI coupler. *J Lightwave Technol*, 2010, 28: 1323–1331
- 125 Jeong S-H, Morito K. Compact optical 90° hybrid employing a tapered 2×4 MMI coupler serially connected by a 2×2 MMI coupler. *Opt Express*, 2010, 18: 4275–4288
- 126 Yang W, Yin M, Li Y, et al. Ultra-compact optical 90° hybrid based on a wedge-shaped 2×4 MMI coupler and a 2×2 MMI coupler in silicon-on-insulator. *Opt Express*, 2013, 21: 28423–28431
- 127 Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al. Silicon optical modulators. *Nat Photonics*, 2010, 4: 518–526
- 128 Reed G T, Jason Png C E. Silicon optical modulators. *Mater Tod*, 2005, 8: 40–50
- 129 Della Corte F G, Merenda M, Cocorullo G, et al. Modulation speed improvement in a Fabry-Perot thermo-optical modulator through a driving signal optimization technique. *Opt Eng*, 2009, 48: 074601
- 130 Seo S Y, Lee J, Shin J H, et al. The thermo-optic effect of Si nanocrystals in silicon-rich silicon oxide thin films. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 2526–2528
- 131 Dubovitsky S, Steier W H, Yegnanarayanan S, et al. Analysis and improvement of Mach-Zehnder modulator linearity performance for chirped and tunable optical carriers. *J Lightwave Technol*, 2002, 20: 858–863
- 132 Liao L, Samara-Rubio D, Morse M, et al. High speed silicon Mach-Zehnder modulator. *Opt Express*, 2005, 13: 3129–3135
- 133 Basak J, Liao L, Liu A, et al. Developments in gigascale silicon optical modulators using free carrier dispersion mechanisms. *Adv Opt Technol*, 2008, 2008: 678948
- 134 Gardes F Y, Reed G T, Emerson N G, et al. A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon on insulator. *Opt Express*, 2005, 13: 8845–8854
- 135 You J B, Park M, Park J W, et al. 12.5 Gbps optical modulation of silicon racetrack resonator based on carrier depletion in asymmetric p-n diode. *Opt Express*, 2008, 16: 18340–18344
- 136 Park J W, You J B, Kim I G, et al. High modulation efficiency silicon Mach-Zehnder optical modulator based on carrier depletion in a PN diode. *Opt Express*, 2009, 17: 15520–15524
- 137 Liu A, Liao L, Rubin D, et al. Recent development in a high-speed silicon optical modulator based on reverse-biased pn diode in a silicon waveguide. *Semicond Sci Technol*, 2008, 23: 064001
- 138 Thomson D J, Gardes F Y, Fedeli J M, et al. 50 Gb/s silicon optical modulator. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24: 234–236
- 139 Baba T, Akiyama S, Imai M, et al. 50 Gb/s ring-resonator-based silicon modulator. *Opt Express*, 2013, 21: 11869–11876
- 140 Xiao X, Xu H, Li X, et al. 60 Gbit/s silicon modulators with enhanced electro-optical efficiency. In: *Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, 2013*, OW4J3: 1–3
- 141 Biberman A, Timurdogan E, Zortman W A, et al. Adiabatic microring modulators. *Opt Express*, 2012, 20: 29223–29236
- 142 Kuo Y H, Lee Y K, Ge Y, et al. Quantum-confined stark effect in Ge/SiGe quantum wells on Si for optical modulators. *IEEE J Sel Top Quant*, 2006, 12: 1503–1512
- 143 Chaisakul P, Marris-Morini D, Isella G, et al. Quantumconfined Stark effect measurements in Ge/SiGe quantumwell structures. *Opt Lett*, 2010, 35: 2913–2915
- 144 Feng D, Liao S, Liang H, et al. High speed GeSi electro-absorption modulator at 1550 nm wavelength on SOI waveguide. *Opt Express*, 2012, 20: 22224–22232
- 145 Rong Y, Ge Y, Huo Y, et al. Quantum-confined stark effect in Ge/SiGe quantum wells on Si. *IEEE J Sel Top Quant*, 2010, 16: 85–92
- 146 Janner D, Tulli D, García-Granda M, et al. Micro-structured integrated electro-optic LiNbO₃ modulators. *Laser Photon Rev*, 2009, 3: 301–313
- 147 Clark J, Lanzani G. Organic photonics for communications. *Nat Photonics*, 2010, 4: 438–446
- 148 Leuthold J, Koos C, Freude W. Nonlinear silicon photonics. *Nat Photonics*, 2010, 4: 535–544
- 149 Leuthold J, Freude W, Brosi J M, et al. Silicon organic hybrid technology-A platform for practical nonlinear optics. *IEEE*, 2009, 97: 1304–1316
- 150 Alloatti L, Palmer R, Diebold S, et al. 100 GHz silicon-organic hybrid modulator. *Light: Sci Appl*, 2014, 3: e173–e173
- 151 Lauermaun M, Palmer R, Koeber S, et al. 16QAM silicon-organic hybrid (SOH) modulator operating with 0.6 Vpp and 19 fJ/bit at 112 Gbit/s. In: *CLEO: Science and Innovations, San Jose, 2014*. SM2G-6

- 152 Liu M, Yin X, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator. *Nature*, 2011, 474: 64–67
- 153 Midrio M, Galli P, Romagnoli M, et al. Graphene-based optical phase modulation of waveguide transverse electric modes. *Photon Res*, 2014, 2: A34–A40
- 154 Du W, Hao R, Li E. The study of few-layer graphene based Mach-Zehnder modulator. *Opt Commun*, 2014, 323: 49–53
- 155 Casalino M. Silicon resonant cavity enhanced photodetector based on the internal photoemission effect at 1.55 μm fabrication and characterization. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 251104
- 156 Casalino M, Sirlito L, Moretti L, et al. Design of a silicon RCE Schottky photodetector working at 1.55 μm . *J Lumin*, 2006, 121: 399–402
- 157 Zhu S, Yu M B, Lo G Q, et al. Nearinfrared waveguide-based nickel silicide Schottky-barrier photodetector for optical communications. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 081103
- 158 Brueck S R J, Diadiuk V, Jones T, et al. Enhanced quantum efficiency internal photoemission detectors by grating coupling to surface plasma waves. *Appl Phys Lett*, 1985, 46: 915–917
- 159 Torosian K M, Karakashian A S, Teng Y Y. Surface plasma-enhanced internal photoemission in gallium arsenide Schottky diodes. *Appl Opt*, 1987, 2: 2650–2652
- 160 Akbari A, Tait R N, Berini P. Surface plasmon waveguide schottky detector. *Opt Express*, 2010, 18: 8505–8514
- 161 Scales C, Breukelaar I, Berini P. Surface-plasmon Schottky contact detector based on a symmetric metal stripe in silicon. *Opt Lett*, 2010, 35: 529–531
- 162 Assefa S, Xia F, Bedell S W, et al. CMOS-integrated high-speed MSM germanium waveguide photodetector. *Opt Express*, 2010, 18: 4986–4999
- 163 Sheng Z, Liu L, Brouckaert J, et al. InGaAs PIN photodetectors integrated on silicon-oninsulator waveguides. *Opt Express*, 2010, 18: 1756–1761
- 164 Brouckaert J, Roelkens G, Thourhout D Van, et al. Thin-film III-V photodetectors integrated on silicon-oninsulator photonic ICs. *J Lightwave Technol*, 2007, 25: 1053–1060
- 165 Sheng Z, Liu L, Brouckaert J, et al. InGaAs PIN photodetectors integrated on silicon-on-insulator waveguides. *Opt Express*, 2010, 18: 1756–1761
- 166 Feng S, Geng Y, Lau K M, et al. Epitaxial III-V-on-silicon waveguide butt-coupled photodetectors. *Opt Lett*, 2012, 37: 4035–4037
- 167 Stiff-Roberts A D. Quantum-dot infrared photodetectors: A review. *J Nanophoton*, 2009, 3: 031607
- 168 Barve A V, Lee S J, Noh S K, et al. Review of current progress in quantum dot infrared photodetectors. *Laser Photon Rev*, 2010, 4: 738–750
- 169 Schneider H, Liu H C, Winnerl S, et al. Room-temperature midinfrared two-photon photodetector. *Phys Rev B*, 2008, 93: 101114
- 170 Luan H C, Lim D R, Lee K K, et al. High-quality Ge epilayers on Si with low threading-dislocation densities. *Appl Phys Lett*, 1999, 75: 2909–2911
- 171 Michel J, Liu J, Kimerling L C. High-performance Ge-on-Si photodetectors. *Nat Photon*, 2010, 4: 527–534
- 172 Yamaguchi M, Tachikawa M, Sugo M. Analysis for dislocation density reduction in selective area grown GaAs films on Si substrates. *Appl Phys Lett*, 1990, 56: 27–29
- 173 Vivien L, Osmond J, Fédéli J M, et al. 42 GHz p.i.n germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator waveguide. *Opt Express*, 2009, 17: 6252–6257
- 174 Feng D, Liao S, Dong P, et al. High-speed Ge photodetector monolithically integrated with large cross-section siliconon-insulator waveguide. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 261105
- 175 Beals M, Michel J, Liu J F, et al. Process flow innovations for photonic device integration in CMOS. In: *Proceedings of Silicon Photonics III*, San Jose, 2008. 689804
- 176 Yin T, Cohen R, Morse M M, et al. 31GHz Ge n-ip waveguide photodetectors on Silicon-on-Insulator substrate. *Opt Express*, 2007, 15: 13965–13971
- 177 Ahn D, Hong C Y, Liu J, et al. High performance, waveguide integrated Ge photodetectors. *Opt Express*, 2007, 15: 3916–3921
- 178 Vivien L, Polzer A, M-Morini D, et al. Zero-bias 40 Gbit/s germanium waveguide photodetector on silicon. *Opt Express*, 2012, 20: 1096–1101
- 179 Ding L, Liow T Y, Lim E J, et al. Ge waveguide photodetectors with responsivity roll-off beyond 1620 nm using localized stressor. In: *proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, 2012. OW3G-4
- 180 Takenaka M, Morii K, Sugiyama M, et al. Dark current reduction of Ge photodetector by GeO_2 surface passivation and gas-phase doping.

- Opt Express, 2012, 20: 8718–8725
- 181 Novack A, Gould M, Yang Y, et al. Germanium photodetector with 60 GHz bandwidth using inductive gain peaking. Opt Express, 2013, 21: 28387–28393
- 182 Kang Y, Liu H D, Morse M, et al. Monolithic germanium/silicon avalanche photodiodes with 340 GHz gainbandwidth product. Nat Photonics, 2009, 3: 59–63
- 183 Zaoui W S, Chen H W, Bowers J E, et al. Frequency response and bandwidth enhancement in Ge/Si avalanche photodiodes with over 840 GHz gain-bandwidth-product. Opt Express, 2009, 17: 12641–12649
- 184 Kang Y, Saado Y, Morse M, et al. Ge/Si waveguide avalanche photodiodes on SOI substrates for high speed communication. ECS Trans, 2010, 33: 757–764
- 185 Duan N, Liow T Y, Lim A E, et al. High Speed Waveguide-Integrated Ge/Si Avalanche Photodetector. In: Proceedings of Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, 2013. OM3K-3
- 186 Carroll M S, Childs K, Jarecki R, et al. Ge-Si separate absorption and multiplication avalanche photodiode for Geiger mode single photon detection. Appl Phys Lett, 2008, 93: 183511
- 187 Liu A, Liao L, Chetrit Y et al. Wavelength division multiplexing based photonic integrated circuits on siliconon-insulator platform. IEEE J Sel Top Quant, 2010, 16: 23–32
- 188 Dong P, Xie C, Chen L, et al. 112 Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon. Opt Express, 2012, 20: B624–B629
- 189 Dong P, X Liu, Chandrasekhar S, et al. Monolithic Silicon Photonic Circuits Enable 112 Gb/s PDMQPSK Transmission over 2560 km SSF. In: Proceedings of Optical Communication (ECOC 2013), 39th European Conference, London, 2013. 1–3
- 190 Dong P, Liu X, Sethumadhavan C, et al. 224 Gb/s PDM-16-QAM Modulator and Receiver based on Silicon Photonic Integrated Circuits. In: Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, 2013. PDP5C-6
- 191 Miller D A B. Optical interconnects to electronic chips. Appl Opt, 2010, 49: F59–F70
- 192 McGrath D. Intel is developing optical chip-to-chip interconnects. Electron Eng Times, 2009, 1556: 39
- 193 Freymann G, Ledermann A, Thiel M, et al. Threedimensional nanostructures for photonics. Adv Funct Mater, 2010, 20: 1038–1052
- 194 Arakawa Y, Nakamura T, Urino Y, et al. Silicon photonics for next generation system integration platform. IEEE Commun Mag, 2013, 51: 72–77
- 195 Urino Y, Shimizu T, Okano M, et al. First demonstration of high density optical interconnects integrated with lasers, optical modulators and photodetectors on single silicon waveguide resonators. In: Proceedings of European Conference and Exposition on Optical Communications, Geneva Switzerland, 2011. We-9
- 196 Densmore A, Vachon M, Xu D X, et al. Silicon photonic wire biosensor array for multiplexed real-time and label-free molecular detection. Opt Lett, 2009, 34: 3598–3600
- 197 Claes T, Molera J G, Vos K De, et al. Label-free biosensing with a slot-waveguidebased ring resonator in silicon on insulator. IEEE Photon Lett, 2009, 1: 197–204
- 198 Janz S, Densmore A, Xu D X, et al. Silicon-based microphotonics for biosensing applications. In: Optical Waveguide Sensing and Imaging. Netherlands: Springer, 2008. 167–194
- 199 Robinson J T, Chen L, Lipson M. On-chip gas detection in silicon opticalmicrocavities. Opt Express, 2008, 16: 4296–4301
- 200 Schmid J H, Sinclair W, García J, et al. Silicon-oninsulator guided mode resonant grating for evanescent field molecular sensing. Opt Express, 2009, 17: 18371–18380
- 201 Torres-Costa V, Martin-Palma R J. Application of nanostructured porous silicon in the field of optics. J Mater Sci, 2010, 45: 2823–2838
- 202 Schultz O, Glunz S W, Willeke G P. Multicrystalline silicon solar cells exceeding 20% efficiency. Prog Photovoltaics Res Appl, 2004, 12: 553–558
- 203 Sai H, Saito K, Hozuki N, et al. Relationship between the cell thickness and the optimum period of textured back reflectors in thin-film microcrystalline silicon solar cells. Appl Phys Lett, 2013, 102: 053509

Recent progress of silicon photonics

WANG XingJun^{*}, SU ZhaoTang & ZHOU ZhiPing

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

As people urgently require more information capacity, higher speed and lower cost, silicon photonics become a hot topic and very promising key technologies in optical communications and high-speed computers fields. Silicon photonics is a kind of technology to fabricate optoelectronic devices on silicon platform by using standard CMOS integrated circuit. The cost, power consumption, and size of devices can be reduced significantly using the investment, facilities, and experience of CMOS integrated circuit design, manufacturing, packaging, integration, and scalability. In recent years, silicon photonics has developed to a new stage, many key components have reached commercial standards, the part of performance is even higher than current commercial devices. In this paper, we introduce the recent major breakthrough of silicon photonics, including some key components, waveguides, gratings, polarization beam splitters, mixers, filters, modulators, detectors and lasers. Finally, silicon photonics future development direction and challenges are presented briefly.

silicon photonics, silicon based light source, silicon modulator, germanium detector, passive device

PACS: 42.82.-m, 85.60.Jb, 42.79.Hp, 85.60.Gz, 42.79.Gn

doi: 10.1360/SSPMA2014-00300