

# 介质辅助键合 III-V/硅基混合集成金属限制激光器

杨跃德 隋少帅 唐明英 肖金龙 杜云 黄永箴\*

中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083

**摘要** 硅基键合 III-V 材料激光器, 作为互补氧化物半导体(CMOS)兼容硅基光互连系统中的一个关键元件, 近年来引起了人们的高度重视并得到了广泛的研究。金属限制结构可以增强器件对光场的限制, 提高界面反射率和工艺容差, 从而实现小体积低能耗硅片上集成光源。对金属限制介质辅助键合 III-V/硅基混合集成激光器进行了研究, 介绍了该激光器的基本原理和实验方案, 并对制作的的不同结构激光器的特性进行了分析, 该研究工作的开展将有助于实现 III-V/硅基混合集成激光器在低能耗高带宽的硅基光互连中的应用。

**关键词** 半导体激光器; 晶片键合; III-V/硅基混合集成; 金属限制

**中图分类号** TN383 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.110010

## Investigation of III-V on Silicon Adhesively Bonded Semiconductor Lasers with Metal Confinement

Yang Yuede Sui Shaoshuai Tang Mingying Xiao Jinlong

Du Yun Huang Yongzhen

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** Recently, the III-V on silicon bonded lasers, as a fundamental component of complementary metal oxide semiconductor (CMOS) compatible silicon optical interconnects, have attracted great attention and been extensively studied. The metallic structure can enhance the optical confinement inside the laser resonator, increase the reflectivity at the boundary and give a large fabrication tolerance. Thus a small-volume low-power-consumption laser can be achieved with the metallic confinement structure. The principle and experimental scheme for the III-V on silicon adhesively bonded semiconductor lasers with metal confinement are introduced, and the lasing characteristics are analyzed. Further development of hybrid laser may lay the foundation for the low-power-consumption high-bandwidth optical interconnects.

**Key words** semiconductor laser; wafer bonding; III-V/Si hybrid integration; metal confinement

**OCIS code** 140.2010; 140.3410; 140.5960

## 1 引言

随着信息技术的飞速发展和微纳电子器件集成度的不断提高, 数据传输逐渐成为计算机芯片性能发展面临的主要挑战。传统的电互连方式已经不能在保持低能耗的同时提供芯片所需带宽。互连速率和能耗将成为限制整个系统处理能力提升的瓶颈<sup>[1-2]</sup>。因此, 需要发展新的互连技术以取代电互连, 而基于光子学技术的光互连, 由于光子具有低损耗高带宽的优点, 是一种芯片内低能耗和大数据容量通信的可行方案<sup>[3-4]</sup>。各种光互连技术平台中, 硅(Si)基光子学平台由于其可以利用成熟的互补氧化物半导体(CMOS)制造工艺进行大规模加工, 引起了人们的关注<sup>[5]</sup>。由于硅是间接带隙半导体材料, 直接注入发光效率低, 因此如何在硅上实现高性能的激光器是首先需要解决的问题<sup>[6]</sup>。基于 IV 族材料的硅拉曼激光器和锗激光器仍未实现室温连续电注入工作<sup>[7-8]</sup>, 而利用

收稿日期: 2014-04-09; 收到修改稿日期: 2014-06-16; 网络出版日期: 2014-09-16

基金项目: 国家 863 计划(2012AA012202)、国家自然科学基金(61061160502)

作者简介: 杨跃德(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事半导体光学微腔器件方面的研究。

E-mail: yyd@semi.ac.cn

直接带隙 III-V 材料和硅混合集成,是光互连所需片上光源的一种可靠的途径<sup>[9-13]</sup>。

2006 年美国加州大学圣巴巴拉分校(UCSB)和比利时根特大学研究者各自独立地利用晶片键合技术实现了电抽运硅上键合 III-V 激光器<sup>[14-15]</sup>。随后这两个课题组均继续开展了许多研究工作,其中 UCSB 研究的激光器主要特点是光场主要限制在硅波导中,器件的谐振腔结构也在主要硅层形成,其消逝波在 III-V 量子阱中被放大形成激光<sup>[16-19]</sup>,而比利时根特大学研究的激光器光场主要限制在 III-V 材料,并在 III-V 材料层制作谐振腔结构,键合到硅基波导实现耦合输出<sup>[20-23]</sup>。在国内中国科学院半导体研究所(简称中科院半导体所)的研究组采用直接键合的方法制作了微结构选模的硅基 FP 和微环结构的混合激光器<sup>[24-25]</sup>。北京大学和中科院半导体所合作,制作硅波导和 III-V 激光器结构,而后通过高精度对准金属键合,实现 III-V 激光器的硅波导耦合<sup>[26-27]</sup>。

随着光互连技术的发展,能耗已经逐渐成为需要考虑的首要问题,研究低能耗、高集成度的硅上激光器将是降低光互连系统能耗的关键。与介质限制相比,金属限制可以提高端面反射率,也可以降低回音壁模式对刻蚀侧壁的要求,适合制作小体积低能耗的光源。同时金属限制结构带来较大的工艺容差,可以利用基于普通接触光刻的平面加工工艺实现低成本大规模的加工制作。本文中利用苯并环丁烯(BCB)介质辅助键合技术实现了 III-V 量子阱外延片和硅波导的混合集成,并基于普通光刻和感应耦合等离子体(ICP)刻蚀等平面微纳加工工艺制备了金属限制回音壁型微腔和法布里-珀罗(FP)结构的 AlGaInAs-硅基混合集成激光器,实现了室温下电注入激射。关于金属限制介质辅助键合 III-V/硅基混合集成激光器研究工作的开展,为硅基光互连所需的低能耗激光器提供了一种可靠的解决方案。

## 2 金属限制介质辅助键合 III-V/硅基混合集成激光器的设计与制备

与其他键合技术相比,介质辅助键合具有工艺简单、键合界面要求低和热应力小等优点。BCB 作为一种常用的辅助键合介质具有高平坦度和在光通信波长低吸收损耗的特点,利用 BCB 介质辅助键合技术,可以实现高强度 III-V 族外延片和硅波导晶片的键合。通常的 FP 激光器采用解理端面作为反射镜面,其反射率受制于半导体和空气的折射率差,一般小于 30%。受该低反射率的影响,FP 激光器一般需要较大的腔长,以获得较高的模式品质因子来实现激光器的室温连续工作,但是腔长的增加也引起了功耗大和自由谱宽(FSR)小的问题。利用金属覆盖结构制作的半导体/氧化硅/金属可以实现大于 90%的模式反射率,通过优化氧化硅层的厚度和金属材料,该反射率可以达到 98%以上,因此可以利用这种金属限制结构制作短腔长低阈值的 FP 结构激光器。在回音壁模式圆形微腔中,其模式光场的限制利用边界的光全内反射实现,其理论反射率可以接近 100%,但是由于光刻和干法刻蚀等加工工艺带来的侧壁粗糙,增加了光场在边界的散射损耗。在金属覆盖结构中,虽然引入了额外的金属吸收损耗,但却可以抑制散射损耗,从而降低器件对侧壁光滑度的需求以提高工艺容差。因此本文基于 BCB 辅助键合技术和金属限制结构,开展了 FP 型腔和回音壁型微腔的 III-V/硅基混合集成激光器的研究工作。

采用 BCB 辅助键合技术,成功实现了 AlGaInAs/InP 多量子阱外延片与绝衬底的硅(SOI)波导的键合。SOI 片中硅和掩埋层 SiO<sub>2</sub>的厚度分别为 340 nm 和 1 μm,硅波导的光刻采用 i-line (365 nm) 的投影式光刻机进行,光刻版为明版,即刻蚀掉波导外其他所有区域,波导宽度范围为 500 nm~2 μm。硅材采用 ICP 方法进行干法刻蚀,刻蚀深度超过 300 nm。接着覆盖 BCB 填平硅波导,BCB 的厚度通过调节 BCB 浓度和匀胶机的转速进行控制,以实现波导上的 BCB 厚度小于 100 nm,保证 III-V 族激光器和硅波导之间光场的有效耦合。AlGaInAs 多量子阱外延片切成 1 cm 见方的小片后键合在 BCB 平坦化后的硅波导上,在 250 °C 氮气环境下固化 BCB。利用研磨机减薄 InP 衬底后,采用 3:1 HCl/H<sub>2</sub>O 和 3:1:1 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O(体积比)溶液分别去除剩余的 InP 衬底和 InGaAsP 腐蚀阻挡层,留下约 2 μm 的 AlGaInAs/InP 的器件层。整个键合流程的温度均低于 300 °C,低温键合可以保证硅基晶片中的掺杂和二极管不被破坏,实现和 CMOS 加工的后端兼容。

该 III-V/硅基混合集成微腔激光器的后期加工主要利用普通的接触式光刻和 ICP 刻蚀等平面加工工艺进行。与电子束光刻相比,接触式光刻适合大规模加工并能降低加工成本。首先利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)在键合的片子上升至 500 nm 的 SiO<sub>2</sub>层作为干法刻蚀 InP 的掩膜层;然后利用普通光刻和 ICP 刻蚀进行掩膜层的刻蚀,实现光刻版到掩膜的图形转移;接下来利用 ICP 刻蚀大约 1.7 μm 到 n-InP 的欧

姆接触层,并结合溴水湿法腐蚀精确控制刻蚀深度并平滑侧壁, $n$ -InP层的厚度需要在保证电注入通道大小的同时减小侧向光场的泄漏。图形化的共面金属电极采用光刻和金属带胶剥离来实现,Au-Ge-Ni和Ti-Pt-Au金属分别用作 $n$ 型和 $p$ 型的接触金属,器件侧壁的 $p$ 型电极金属保留以增强光场的限制并提高散热特性,加工完成的器件经过减薄衬底后解离进行测试。图1(a)是制备完成后激光器的硅波导的横截面扫描电子显微镜(SEM)图片,其中硅波导的宽度约为 $1.6\ \mu\text{m}$ ,其上的BCB厚度约为 $80\ \text{nm}$ ,该厚度可以满足AlGaInAs/InP的器件层和硅波导之间光场耦合的需要, $n$ -InP的厚度约为 $90\ \text{nm}$ 。图1(b)是半径约 $10\ \mu\text{m}$ 的圆盘激光器在ICP刻蚀后的SEM图片,刻蚀底面为 $n$ -InP层。

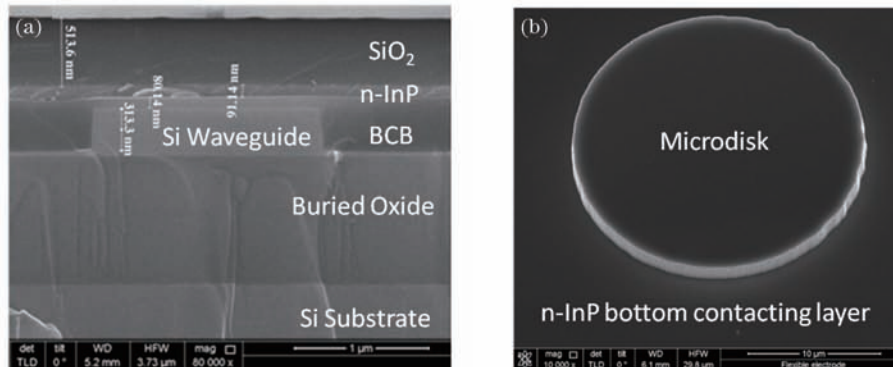


图1 (a) 键合激光器输出硅波导横截面扫描电子显微镜图片; (b) ICP干法刻蚀后微盘激光器的SEM图片

Fig.1 SEM images of (a) cross section of fabricated silicon waveguide and (b) microdisk resonator after inductively coupled plasma (ICP) dry etching

### 3 金属限制介质辅助键合 III-V/硅基混合集成激光器的实验结果

#### 3.1 微盘和微环型 III-V/硅基混合集成激光器

半径 $8\sim 20\ \mu\text{m}$ 的微盘激光器,和外径 $20\ \mu\text{m}$ 不同内径的微环激光器均采用上述的加工工艺完成了器件的制备。在对器件衬底进行减薄和解离后,激光器焊在铜热沉上进行测试,半导体制冷器(TEC)用来实现器件在室温附近的温度控制。多模拉锥光纤直接耦合到解离的硅波导端面以收集激光器的出射光,并分别接入到光探测器和光谱仪中测试其输出总功率和激射光谱,不同尺寸和结构的微腔激光器均实现了室温下的电注入激射。

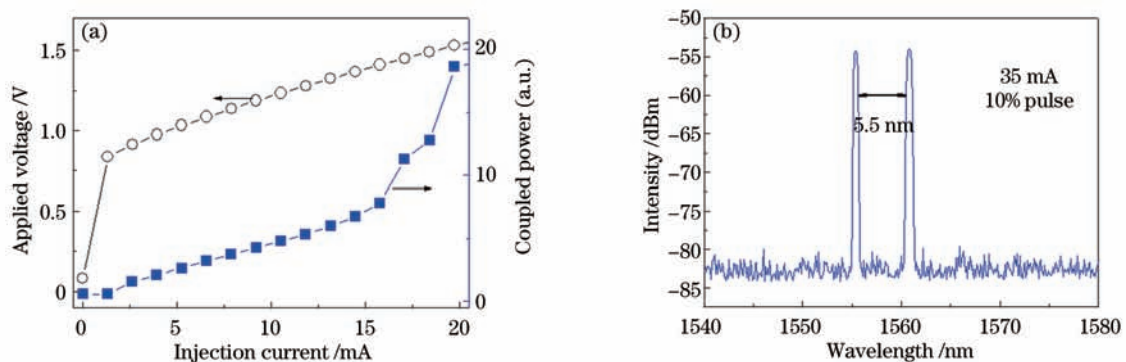


图2 外径 $20\ \mu\text{m}$ ,内径 $14.5\ \mu\text{m}$ 的微环激光器的(a)光纤耦合功率与器件电压随连续注入电流的变化图,(b)脉冲注入电流 $35\ \text{mA}$ 下的激射光谱。

Fig.2 Mirroring laser with outer and inner radii of  $20$  and  $14.5\ \mu\text{m}$ . (a) Fiber coupled power and applied voltage versus continuous injection current; (b) lasing spectrum under pulsed injection current of  $35\ \text{mA}$

图2是一外径 $20\ \mu\text{m}$ ,内径 $14.5\ \mu\text{m}$ 的AlGaInAs/InP-硅基微环激光器在TEC温度 $288\ \text{K}$ 的电注入测试结果。图2(a)是多模光纤耦合光功率与器件施加电压随连续注入电流的变化图,其中空心圆代表施加电压,可以得出激光器的开启电压在 $0.8\ \text{V}$ 左右,器件电阻约 $30\ \Omega$ ,实心方块代表多模光纤耦合光功率,可以看出明显拐点,阈值约为 $16\ \text{mA}$ ,对应阈值电流密度为 $2.6\ \text{kA}/\text{cm}^2$ ,该阈值电流密度略大于相同AlGaInAs量子

阱材料外延片制作的 InP 基激光器。图 2(b) 是脉冲注入电流为 35 mA 下的激光光谱, 注入电流脉冲宽度为 100 ns, 占空比为 10%, 从光谱看出在 1560 nm 波长附近纵模间隔约为 5.5 nm, 按外径计算获得的回音壁模式群折射率约为 3.5。

### 3.2 III-V/硅基混合集成多波长微盘激光器阵列

在单个微盘激光器的基础上, 通过改变谐振腔半径研制了包括 15 个微盘的 AlGaInAs/InP-硅基混合集成多波长激光器阵列, 制备完的器件显微镜图片如图 3(a) 所示。微盘激光器的半径为 12~12.7  $\mu\text{m}$ , 相邻器件半径差为 50 nm, 相邻器件间距在 30  $\mu\text{m}$  左右。该多波长微盘激光器阵列的各个微盘激光器单元均实现了室温脉冲电注入激励, 注入电流脉冲宽度为 100 ns, 占空比为 10%。单个激光器脉冲阈值电流为 15~20 mA, 对应的阈值电流密度为 3~4  $\text{kA}/\text{cm}^2$ , 略大于圆环激光器的阈值电流密度。目前激光器的热特性影响较差, 主要受制于键合介质 BCB 和掩埋  $\text{SiO}_2$  层的高热阻率, 还没有实现室温下的连续电注入工作。

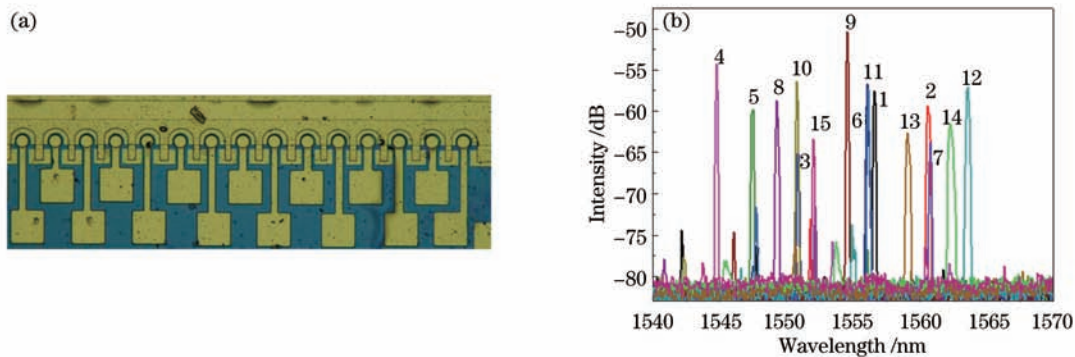


图 3 半径 12~12.7  $\mu\text{m}$  的 15 波长混合集成圆形微盘激光器阵列的 (a) 显微镜图片; (b) 激光光谱图。其中 1 到 15 表示第 1 到 15 个微盘的激光峰

Fig.3 15-wavelength microdisk lasers array with radii from 12  $\mu\text{m}$  to 12.7  $\mu\text{m}$ . (a) Microscope image and (b) lasing spectra. The numbers from 1 to 15 correspond to the lasing peak of 1<sup>st</sup> to 15<sup>th</sup> microdisk

图 3(b) 是该 15 波长 AlGaInAs/InP-硅基混合集成微盘激光器阵列的激光光谱图, 其中 1~15 对应于半径在 12~12.7  $\mu\text{m}$  的微盘激光器的激光峰, 对应的脉冲电流分别为 40, 45, 35, 25, 23, 20, 45, 30, 30, 25, 25, 40, 40, 50, 30 mA。激光波长范围在 1544~1563 nm, 由于激光模式波长受自发热效应以及加工误差的影响较大, 激光模式波长在该范围内分布并不均匀, 并且不同激光器的输出光功率也存在较大的起伏。由于激光器的自由谱宽小于该激光波长范围, 也造成部分激光模式波长的重叠。因此该多波长激光器阵列需要进一步优化器件的散热结构, 减小器件尺寸, 同时实现波长和输出光功率的有效控制。

### 3.3 FP 腔 III-V/硅基混合集成激光器

与普通的 FP 腔激光器利用解理面作为谐振腔反射面不同, 在金属限制的 FP 腔激光器中, 光刻和 ICP 刻蚀的端面覆盖 p 型电极金属用作反射镜面。金属覆盖可以有效提高端面反射率, 以减小器件激光所需腔长; 同时金属也给激光器提供了散热通道, 改善高器件的热特性。这种金属限制 FP 腔 III-V/硅基混合集成激光器实现了室温连续电注入激励。

图 4(a) 是 AlGaInAs/InP-硅基混合集成 FP 腔激光器横截面的 SEM 图, 其中硅波导宽度约为 1.5  $\mu\text{m}$ , InP 波导宽为 6  $\mu\text{m}$ , 上面覆盖了 p 型电极金属, n 型电极金属离 InP 波导边缘约 3  $\mu\text{m}$  以保证小的器件电阻。图 4(b) 是长度 415  $\mu\text{m}$  的 AlGaInAs/InP-硅基混合集成 FP 腔激光器在 TEC 温度 287 K 条件下, 测试得到的光纤耦合功率与器件电压随连续注入电流的变化图, 从图中可以看出激光器的电阻约为 7  $\Omega$ , 阈值约为 50 mA, 对应阈值电流密度为 2  $\text{kA}/\text{cm}^2$ 。图 4(c) 是该激光器注入电流在 65~75 mA 的光谱, 当电流从 70 mA 增加到 75 mA 时主激光模式从 1553 nm 附近跳到 1560 nm 附近, 相当于 9 个纵模间隔。激光器模式纵模间隔 0.8 nm, 对应于群折射率为 3.65。图 4(d) 是该激光器的细致光谱, 通过多峰洛伦兹拟合可以看出该激光模式实际上由 3 个峰组成, 对应于 FP 激光器的多个横模。

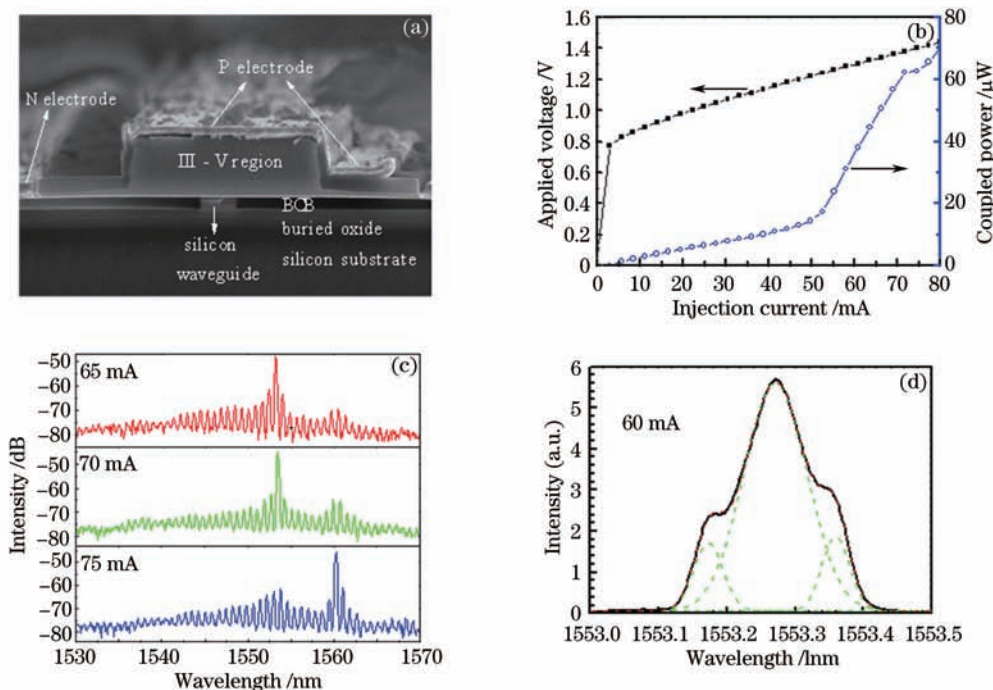


图4 (a) AlGaInAs/InP-硅基混合集成激光器横截面的SEM图。(b) 长度415  $\mu\text{m}$  宽6  $\mu\text{m}$  激光器在287 K条件下的 (b) 光纤耦合功率与器件电压随连续注入电流的变化图, (c) 不同电流光谱图, (d) 激光峰细致光谱图

Fig.4 (a) Cross-sectional-view SEM image of AlGaInAs-Si hybrid FP laser; (b) fiber coupled power and applied voltage versus continuous injection current, (c) lasing spectra under different currents and (d) detail lasing spectrum for the FP laser with the length and width of 415  $\mu\text{m}$  and 6  $\mu\text{m}$ , respectively

## 4 结束语

CMOS兼容的硅基光互连技术由于其低能耗高带宽的优点,可以解决未来信息发展所面临的互连瓶颈。其中硅上键合激光器作为光互连所需光源的一种可行解决方案,近年来引起了人们广泛的兴趣,本文主要介绍了金属限制介质辅助键合III-V/硅基混合集成激光器方面的研究。关于该混合集成激光器研究工作的开展,将能给硅上低能耗激光器和其在光互连的应用提供一条可靠的解决途径。

## 参考文献

- 1 D A B Miller. Device requirements for optical interconnects to silicon chips [J]. Proc IEEE, 2009, 97(7): 1166-1185.
- 2 M J R Heck, H W Chen, A W Fang, *et al.*. Hybrid silicon photonics for optical interconnects [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2011, 17(2): 333-346.
- 3 J W Goodman, F J Leonberger, S Y Kung, *et al.*. Optical interconnections for VLSI systems [J]. Proc IEEE, 1984, 72(7): 850-866.
- 4 Interconnect Working Group. International Technology Roadmap for Semiconductors [R]. ITRS 2011 Winter Meeting, 2011, [http://www.itrs.net/Links/2011Winter/11\\_Interconnect.pdf](http://www.itrs.net/Links/2011Winter/11_Interconnect.pdf).
- 5 B Jalali, S Fathpour. Silicon photonics[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(12): 4600-4615.
- 6 D Liang, J E Bowers. Recent progress in lasers on silicon [J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 511-517.
- 7 H S Rong, R Jones, A S Liu, *et al.*. A continual-wave Raman silicon laser [J]. Nature, 2005, 433(7027): 725-728.
- 8 R E Camacho-Aguilera, Y Cai, N Patel, J T Bessette, *et al.*. An electrically pumped germanium laser [J]. Opt Express, 2012, 20(10): 11316-11320.
- 9 H Wada, T Kamijoh. Room-temperature CW operation of InGaAsP lasers on Si fabricated by wafer bonding [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(2): 173-175.
- 10 M Razeghi, M Defour, R Blondeau, *et al.*. First CW operation of a  $\text{Ga}_{0.25}\text{In}_{0.75}\text{As}_{0.5}\text{P}_{0.5}$ -InP laser on a silicon substrate [J]. Appl Phys Lett, 1988, 53(24): 2389-2390.

- 11 D Pasquariello, K Hjort. Plasma-assisted InP-to-Si low temperature wafer bonding [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2002, 8(1): 118-131.
- 12 D Liang, A W Fang, H Park, *et al.*. Low-temperature, strong SiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> covalent wafer bonding for III-V compound semiconductors-to-silicon photonic integrated circuits [J]. J Electron Mat, 2008, 37(10): 1552-1559.
- 13 G Roelkens, J Brouckaert, D Taillaert, *et al.*. Integration of InP/InGaAsP photodetectors onto silicon-on-insulator waveguide circuits [J]. Opt Express, 2005, 13(25): 10102-10108.
- 14 A W Fang, H Park, O Cohen, *et al.*. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser [J]. Opt Express, 2006, 14(20): 9203-9210.
- 15 G Roelkens, D Van Thourhout, R Baets, *et al.*. Laser emission and photodetection in an InP/InGaAsP layer integrated on and coupled to a silicon-on-insulator waveguide circuit [J]. Opt Express, 2006, 14(18): 8154-8159.
- 16 A W Fang, B R Koch, R Jones, *et al.*. A distributed Bragg reflector silicon evanescent laser [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(17): 1669-1671.
- 17 A W Fang, R Jones, H Park, *et al.*. Integrated AlGaInAs-silicon evanescent racetrack laser and photodetector [J]. Opt Express, 2007, 15(5): 2315-2322.
- 18 D Liang, M Fiorentino, S Srinivasan, *et al.*. Low threshold electrically-pumped hybrid silicon microring lasers [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2011, 17(6): 1528-1533.
- 19 J C Hulme, J K Doylend, J E Bowers. Widely tunable vernier ring laser on hybrid silicon [J]. Opt Express, 2013, 21(17): 19718-19722.
- 20 J Van Campenhout, P Rojo-Romeo, P Regreny, *et al.*. Electrically pumped InP-based microdisk lasers integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit [J]. Opt Express, 2007, 15(11): 6744-6749.
- 21 G Roelkens, L Liu, D Liang, *et al.*. III-V/silicon photonics for on-chip and inter-chip optical interconnects [J]. Laser Photon Rev, 2010, 4(6): 751-779.
- 22 L Liu, R Kumar, K Huybrechts, *et al.*. An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip [J]. Nature Photonics, 2010, 4(3): 182-187.
- 23 S Keyvaninia, G Roelkens, D Van Thourhout, *et al.*. Demonstration of a heterogeneously integrated III-V/SOI single wavelength tunable laser [J]. Opt Express, 2013, 21(3): 3784-3792.
- 24 Y J Zhang, H W Qu, H L Wang, *et al.*. Hybrid III-V/silicon single-mode laser with periodic microstructures [J]. Opt Lett, 2013, 38(6): 842-844.
- 25 Y J Zhang, H L Wang, H W Qu, *et al.*. A III-V/silicon hybrid racetrack ring single-mode laser with periodic microstructures [J]. Opt Commun, 2013, 301: 112-115.
- 26 T Hong, G Z Ran, T Chen, *et al.*. A selective-area metal bonding InGaAsP-Si laser [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(15): 1141-1143.
- 27 L Tao, L J Yuan, Y P Li, *et al.*. 4- $\lambda$  InGaAsP-Si distributed feedback evanescent lasers with varying silicon waveguide width [J]. Opt Express, 2014, 22(5):5448-5454.