

# 应用于光子集成的硅基混合集成人工微结构硅波导输出激光器研究

王海玲 张冶金 冯朋 渠红伟 郑婉华\*

中国科学院半导体研究所集成光电子国家重点联合实验室, 北京 100083

**摘要** 目前,硅光子集成在光通信和信号处理、微电子系统的片内和片间互连领域成为研究热点。虽然其基础元件如波导、输入/输出(I/O)耦合器、波分复用器、调制器和光探测器性能达到了一定水平,但是硅光子集成电路仍面临挑战,原因是硅基激光光源的制作仍然是一个技术难题。综述了近年来硅基混合集成激光器的进展,介绍了课题组的研究成果。将微结构引入到硅基混合集成硅波导输出激光器中,提出了新型的III-V/硅混合集成的微结构硅波导输出单模激光器。此新型激光器工作在通信波段。其中,InGaAlAs增益结构是通过晶片直接键合的方式与具有微结构的SOI(Si/SiO<sub>2</sub>/Si)集成。激光器模式选择机制是基于SOI中的周期微结构,仅通过标准光刻即可实现。微结构激光器室温连续输出为0.85 mW,脉冲输出为3.5 mW,边模抑制比为25 dB。

**关键词** 激光器;微结构;混合集成;单模激光器;边模抑制比

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.110007

## Investigation on the Si-Based Hybrid Integrated Micro-Structured Laser with Silicon Waveguide Output for Silicon Photonic Integration

Wang Hailing Zhang Yejin Feng Peng Qu Hongwei Zheng Wanhua

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

**Abstract** Silicon photonic integration has generated an outstanding interest for optical telecommunications, signal processing and for inter and intra-chip interconnects in microelectronic systems. The development of basic building blocks such as waveguides, input/output (I/O) couplers, wave-division multiplexers, modulators and photodetectors has reached such a performance level, the silicon photonics integrated circuit is now considered as an emerging challenge in the research area, because the silicon-based laser is the technical difficulty. The progress of the hybrid integrated III-V/Si lasers in recent years is reviewed, then our recent work on the hybrid integrated III-V/Si lasers is reported. A novel III-V/silicon hybrid single-mode laser is designed and fabricated by adding the micro-structure into the hybrid integrated silicon laser. The laser operates at C band, and the AlGaInAs gain structure is bonded onto a patterned silicon-on insulator wafer (Si/SiO<sub>2</sub>/Si) directly. The novel mode selection mechanism based on a periodic micro-structured silicon waveguide is applied. At room temperature, 0.85 mW and 3.5 mW output power in continuous-wave and pulse-wave regimes is obtained, respectively. The side-mode suppression ratio of 25 dB is obtained from the experiments.

**Key words** lasers; micro-structure; hybrid integration; single-mode laser; side-mode suppression ratio

**OCIS codes** 140.3460; 140.5960; 140.3570; 140.3580

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-06-16; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 国家973计划(2012CB933501)、国家自然科学基金(61025025, 61137003, 61274070, 61307033, 61205043)

作者简介: 王海玲(1982—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事硅基混合集成激光器及其集成技术等方面的研究。

E-mail: hlwang07@semi.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: whzheng@semi.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网www.opticsjournal.net

## 1 引言

光子集成是近年来光通信产业的热门话题之一,是多年来业界公认的未来发展方向。但是光子集成技术提出30多年来,从业界的商用情况看,整体仍旧处于初级阶段,还没有达到规模商用的条件,原因是受制于光子集成技术本身的限制和供应链的单一、不成熟性。今天的光子集成市场由几个不同材料系统所分享,包括III-V族化合物,单一半导体材料,二氧化硅和掺稀土玻璃及聚合物。每一个材料系统针对特别的应用和器件。基于硅材料的硅光子集成因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而引起了人们的关注,但其面临的关键挑战是硅是间接带隙材料,不能有效发光,所以需要外部光源提供内部光。外部光源通常是一个分立的激光器,需要小心地对准硅波导,精确的对准十分困难并且昂贵,即使是亚微米级的未对准将导致光子器件的失效,所以硅光子急需解决的难题是直接在硅光子芯片上制作激光源,使其激光自动地对准硅波导。

近年来,国际上一些知名高校和企业都已经开展了硅基混合集成激光器的研究,如美国加州大学圣芭芭拉分校(UCSB)、根特大学、Intel公司等已经报道的在硅材料上实现发光的激光器有硅基拉曼激光器<sup>[1]</sup>,硅基外延激光器,纳米图形化发光<sup>[2]</sup>,纳米晶状硅结构<sup>[3-4]</sup>,硅基混合集成激光器<sup>[5]</sup>。电抽运光源是硅基光子集成回路的关键器件。国内一些研究人员采取各种方法提高激光光源的性能<sup>[6-8]</sup>。对于电抽运的面上硅基混合集成光源的制作,直接III-V/SOI键合与倒装芯片键合的研究发展迅速<sup>[9-17]</sup>。对于倒装芯片键合,不同尺寸的两种器件或材料需要亚微米精度的对齐来确保耦合。对于直接III-V/SOI晶片键合,严格化学处理以及原子尺度表面光滑是必要的,大尺寸的器件可以通过一次键合完成。硅基混合集成面上光源一般运用了微环、微盘、分布反馈(DBF),分布布拉格反射(DBR)及其他谐振腔等结构<sup>[9-17]</sup>,这些结构制作在SOI或者III-V材料上。通常情况下要使用一些昂贵、耗时或不适合大批量的制造技术,例如,电子束、全息曝光、二次外延、聚焦离子束、深紫外光等。如果在整个技术的过程中只是采用1:1标准光刻技术,器件的开发周期和成本可能会大大降低。为了避免高分辨率的工艺,复杂的再生步骤和昂贵的电子束曝光,之前,人们已经在理论上提出了一种单模激光器,它依赖于激光器内部的微结构提供模式选择<sup>[12-13]</sup>。这些微结构可以通过标准低成本半导体工艺来制作。对于III-V/SOI混合结构,首次提出了微结构硅基混合模式激光器,包括跑道环形和直腔型<sup>[13-17]</sup>。本文将介绍硅基混合集成激光器的研究进展,并详细陈述本课题组研发的微结构单纵模III-V/SOI混合模激光器的研究成果。整个工艺过程都是标准光刻,具有低成本且简单的特点。制备出的硅基混合集成人工微结构激光器室温连续输出为0.85 mW,脉冲输出为3.5 mW,边模抑制比为25 dB。

## 2 硅基混合集成激光器的重点制作技术

硅基混合集成激光器的制作有较多方法,如晶片键合和异质外延,目前最成功的是通过晶片键合技术来制作。硅基混合集成采用的键合方式有:苯并环丁烯(BCB)基键合、直接键合、低温氧等离子体辅助键合和SiO<sub>2</sub>共价键直接键合。其中氧等离子体辅助低温键合是通过氧等离子体处理两片不同材料的表面,氧等离子体处理后,产生一层氧化物层,氧化层仅25个原子层厚,其足以将两种材料键合在一起。接着室温下将样品浸入去离子水中或者NH<sub>4</sub>OH溶液中,它们便自然贴在一起,取出后来吹干,然后将贴在一起的样品在250℃~300℃、1 MPa下退火1 h,它们便键合在一起。以前的晶片键合需要较高的退火温度以保证键合界面结实平滑,Si-Si键合温度高达1000℃,InP键合温度高达400℃以上,这样会破坏器件性能。2002年,瑞士Uppsala大学实现了等离子辅助低温InP-Si晶圆的键合技术。实验装置为一个改造过的反应离子刻蚀(RIE)系统。两个晶片分别放在腔室内的上下两个部件上,氧等离子体处理后,上面的可移动部件将两晶片直接压在一起<sup>[18-19]</sup>。氧等离子体辅助低温键合和SiO<sub>2</sub>共价键直接键合的工艺流程如图1所示。

## 3 硅基混合集成激光器研究进展

2005年,UCSB的John Bowers研究组报道了光抽运混合集成硅基倏逝波耦合激光器<sup>[20]</sup>,该激光器的主要特点是光场主要限制在硅波导中,其倏逝波在III-V量子阱中被放大形成激光。随后该研究组对此光抽运激光器进行了优化<sup>[21]</sup>。2006年,UCSB和Intel公司的研究人员推出了世界上第一个电抽运混合集成硅激光器<sup>[22]</sup>。该电抽运激光器结构为III-V/Si F-P腔,利用了III-V族半导体材料的发光特性,并运用成熟的

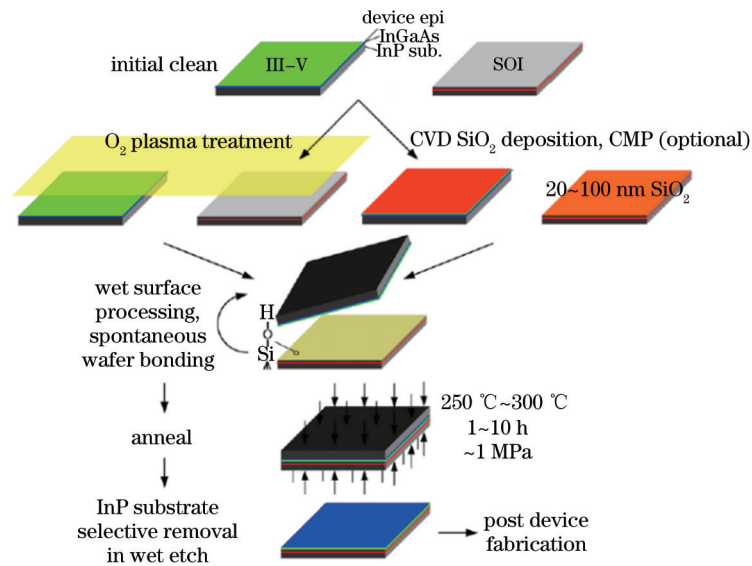


图1 氧等离子体辅助低温晶片键合工艺流程

Fig.1 Oxygen plasma-assisted low-temperature wafer bonding process flow

CMOS 工艺在硅晶圆上制作激光器,从而为制造廉价的量产型硅基光学器件开启了大门。该激光器结构如图 2 所示:对 III-V 族有源区进行电抽运,光波从下面的硅波导输出。由于 III-V 有源区材料横向对称性,键合前无需将硅波导和 III-V 晶圆对准。硅波导在未掺杂的 SOI 结构的(100)面形成。两种晶圆通过氧等离子体辅助键合在一起。SOI 波导晶圆和 III-V 有源区层晶圆键合后,去除 InP 衬底。通过光刻、电感耦合等离子体(ICP)刻蚀掉 p 型 InP 层,  $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  湿法腐蚀量子阱直到 n 型 InP 层,形成  $75\ \mu\text{m}$  宽的台阶, Ni/AuGe/Ni/Au 合金淀积在暴露的 n 型 InP 层作为 n 电极。从波导中间到 n 电极的距离为  $38\ \mu\text{m}$ 。  $4\ \mu\text{m}$  宽的 Pd/Ti/Pd/Au 合金淀积在台面中间作为 p 电极。在 p 电极两侧的 p 型 InP 台面进行  $\text{H}^+$  注入实现电隔离。这样就形成了  $4\ \mu\text{m}$  宽的电流通道。Ti/Au 淀积在台面上形成电极焊台。晶圆解理,波导端面抛光形成  $860\ \mu\text{m}$  长的激

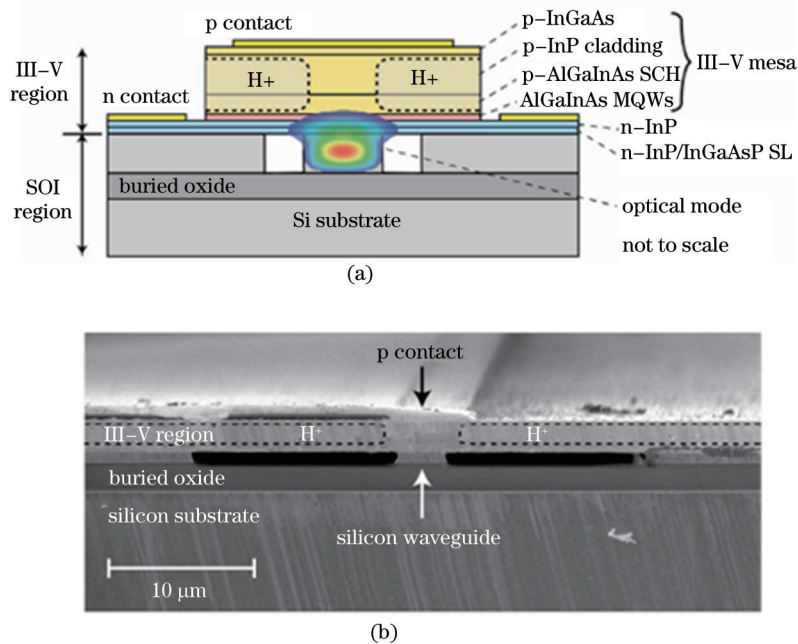


图2 (a)附有光模式分布的混合集成激光器结构示意图;(b)制备的 AlGaInAs-Si 混合集成激光器的横截面扫描电子显微镜 (SEM)图

Fig.2 (a) Schematic of the hybrid laser structure with the optical mode superimposed; (b) a scanning electron microscope cross sectional image of a fabricated hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser



光腔。连续谱工作温度为 70 °C, 阈值电流为 20 mA, 光纤耦合输出功率为 0.5 mW。70 mA 时工作波长在 1577 nm 附近, 100 mA 时激射波长将发生红移。

除了上述混合集成 III-V/Si F-P 腔激光器, UCSB、Intel 公司、根特大学等学术研究机构还实现了很多种其他结构的混合集成 III-V/Si 激光器, 如混合 III-V/Si 微盘、微环激光器。此外, 研究人员在混合 III-V/Si 微盘、微环结构和混合 III-V/Si F-P 结构的基础上, 再在 SOI 衬底和(或)III-V 材料上制作微结构, 如 DFB、DBR 等, 使得这些新结构激光器实现更好的性能和更多的功能, 且很快被作为光源制作在芯片上。

### 3.1 硅基混合集成 DFB 激光器进展

DFB 激光器即分布式反馈激光器, 其内置了布拉格光栅, 属于侧面发射的半导体激光器。DFB 激光器最大的特点是具有非常好的单色性(即光谱纯度), 它的线宽普遍可以达到 1 MHz 以内, 并且具有非常高的边模抑制比, 目前混合硅 DFB 激光器的单模(大于 100 nm 的带宽)光谱的边模抑制比高达 50 dB 以上。

UCSB 在混合集成 III-V/Si DFB 激光器方面做了一些开创性研究<sup>[23-25]</sup>。2008 年, UCSB 首次报道了一种电抽运 DFB 混合 Si/InAlGaAs 倏逝波耦合激光器<sup>[25]</sup>。图 3 给出了该器件结构, 图 4 给出了该器件的功率-电流-电压( $L-I-V$ )曲线和激射光谱。10 °C 时阈值电流为 25 mA, 最大输出功率为 5.4 mW, 最大工作温度 50 °C。90 mA 下实现单模激射, 激射波长为 1599.3 nm, 边模抑制比为 50 dB。

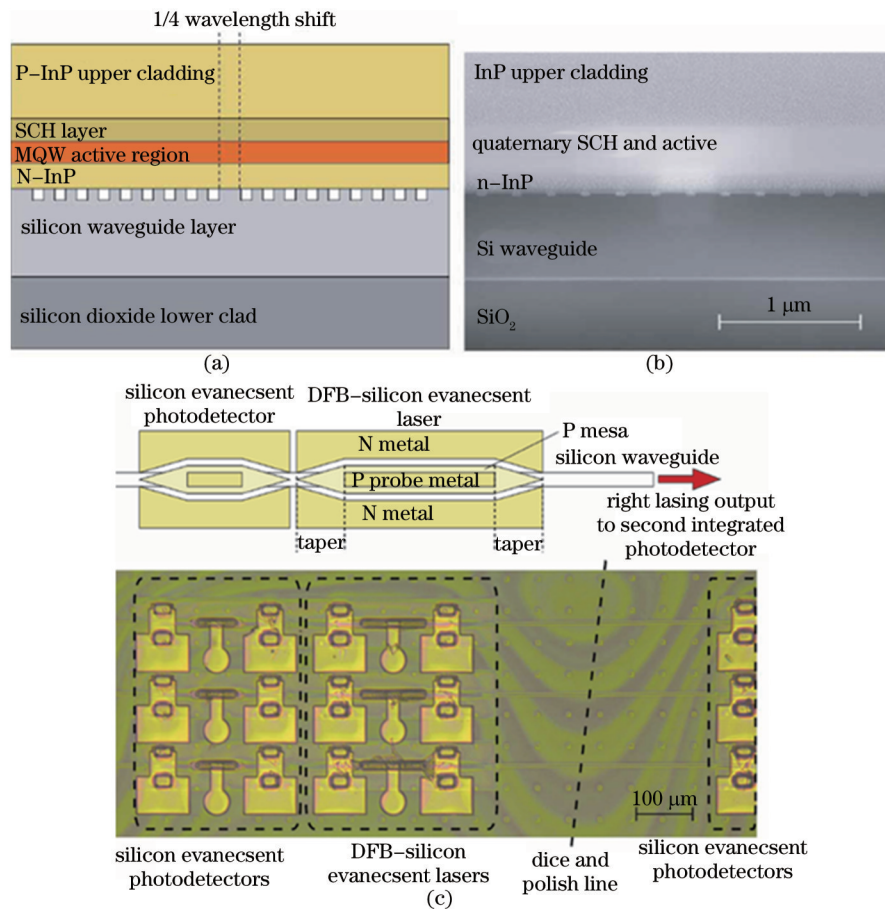


图 3 (a)分布反馈硅倏逝波耦合激光器(DFB-SEL)纵向剖面示意图;(b)DFB-SEL 纵向剖面 SEM图;(c)上面部分为 DFB-SEL 结构示意图,下面部分为 DFB-SEL 与硅倏逝波耦合光子探测器集成的显微镜照片

Fig.3 (a) Distributed feedback silicon evanescent laser (DFB-SEL) longitudinal cross section diagram; (b) SEM image of DFB-SEL longitudinal cross section; (c) (top) DFB-SEL device layout; (bottom) microscope image of DFB-SEL and integrated silicon evanescent photo-detectors

2011 年, UCSB 研究人员制备出相移混合 Si/InP DFB 激光器<sup>[23]</sup>。传统无相移的 DFB 激光器只靠反射扰动来破坏光栅布拉格波长两边模式的退化。加入一个 1/4 波长相移, 可以去掉光栅布拉格波长两边模式的退化。但是电场容易积聚在相移区引起空间烧孔效应而降低器件性能。20 °C 下, 连续工作的 DFB 激光器的

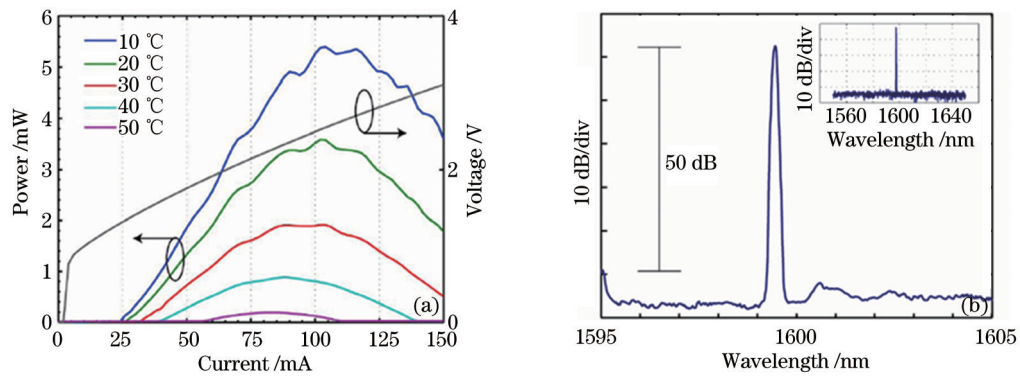


图4 (a) 10 °C ~50 °C底座温度下的 $L-I-V$ 曲线; (b) 90 mA注入电流下的激光光谱, 插图为超过100 nm谱宽下显示的单模激光

Fig.4 (a)  $L-I-V$  curves for stage temperatures of 10 °C~50 °C; (b) lasing spectrum at 90 mA injection current; the inset is the lasing spectrum over a 100 nm span showing single mode lasing

最大输出功率为1.2 mW。2012年,根特大学采用40 nm厚的BCB进行键合,实现了基于混合硅的DFB激光器<sup>[26]</sup>。器件结构如图5所示。最终实现了在10 °C下的输出功率为2.85 mW,阈值电流为20 mA,边模抑制比为45 dB,激光波长为1310 nm。

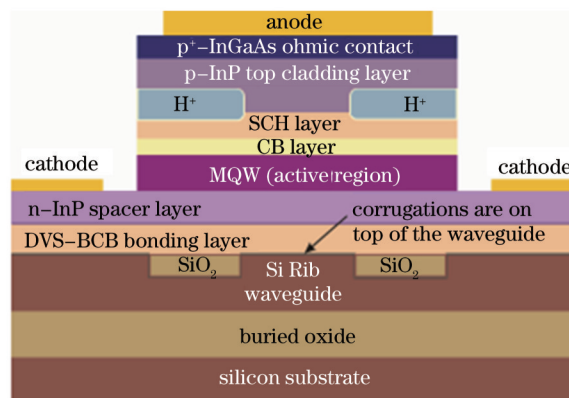


图5 基于DVS-BCB键合的消逝场混合集成III-V/Si DFB激光器横截面示意图。SCH: 分别限制异质结构;CB:载流子阻挡;MQW: 多量子阱;沟槽结构制作在硅脊波导上面

Fig.5 Cross section of an evanescent hybrid III-V/Si DFB laser based on DVS-BCB bonding. SCH: separate confinement heterostructure; CB: carrier blocking; MQW: multi-quantum well; corrugations are fabricated on top of the Si rib waveguide

### 3.2 硅基混合集成DBR激光器进展

由于DFB混合硅激光器有低阈值和器件尺寸短的优点,但是它的输出功率受到小的模式体积的限制,且短的器件导致大的热阻。而DBR的设计空间不同,它较长的腔长,可以降低热阻。

2008年,UCSB研究人员又成功实现了混合III-V/Si DBR倏逝波耦合激光器<sup>[27]</sup>。激光器结构如图6所示:SOI硅波导结构和该研究组之前报道的一样,SOI上硅层厚度为0.7  $\mu\text{m}$ 、硅波导宽度为2  $\mu\text{m}$ 、高度为0.5  $\mu\text{m}$ 。硅波导和量子阱的光限制因子分别是66%和4.4%。从图6(d)中可以看到,两个相距600  $\mu\text{m}$ 的无源DBR反射镜放置在硅波导两端。前后DBR的长度分别是100  $\mu\text{m}$ 和300  $\mu\text{m}$ 。DBR光栅通过E-beam制作在SOI的Si表面。SU-8胶用来覆盖光栅,因为它有2.11的低折射率,并且可以作为低电容接触的介质缓冲层。光栅刻蚀深度为25 nm,占空比为75%,其光栅强度为80  $\text{cm}^{-1}$ 。中间440  $\mu\text{m}$ 长的混合III-V/SOI增益区域和两边80  $\mu\text{m}$ 长的楔形结构都放在激光腔内。楔形结构是通过改变上面III-V族材料层的宽度形成的,用来实现无源硅波导区域和增益区域之间的绝热传输,减小反射和降低两个区域的耦合损耗。这个楔形区域与增益区域一起进行电注入来减小吸收。该器件实现了阈值电流为65 mA,前端输出功率为11 mW,微分效率为15%。200 mA时激光波长为1597.5 nm,边模抑制比为50 dB,如图7所示。

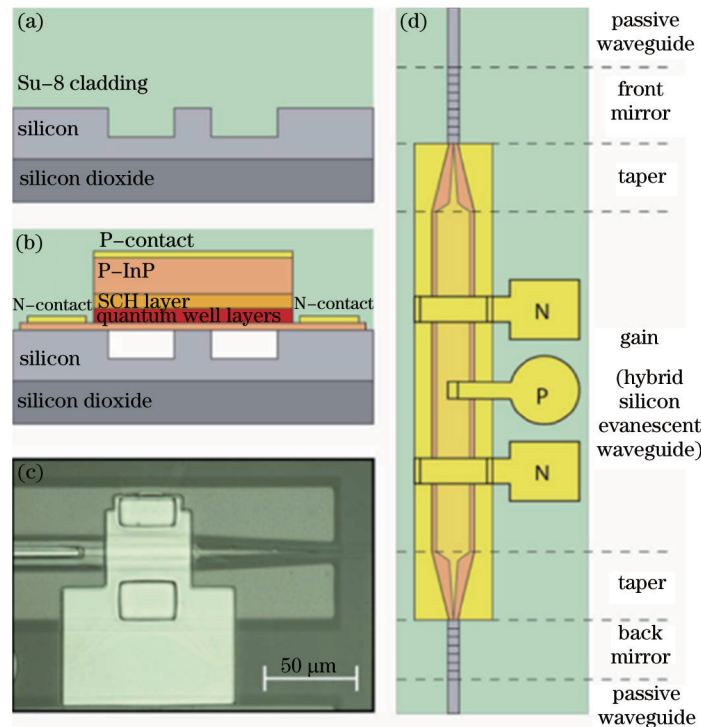


图6 (a)无源硅脊波导和(b)混合硅基消逝场波导横截面;(c)SOI/III-V混合区域到Si无源区域的楔形部分的显微镜照片;(d) DBR-SEL结构的俯视图

Fig.6 (a) Cross section of passive silicon rib waveguide and (b) hybrid silicon evanescent waveguide; (c) microscope image of a hybrid to passive taper; (d) top view of DBR-SEL topographical structure

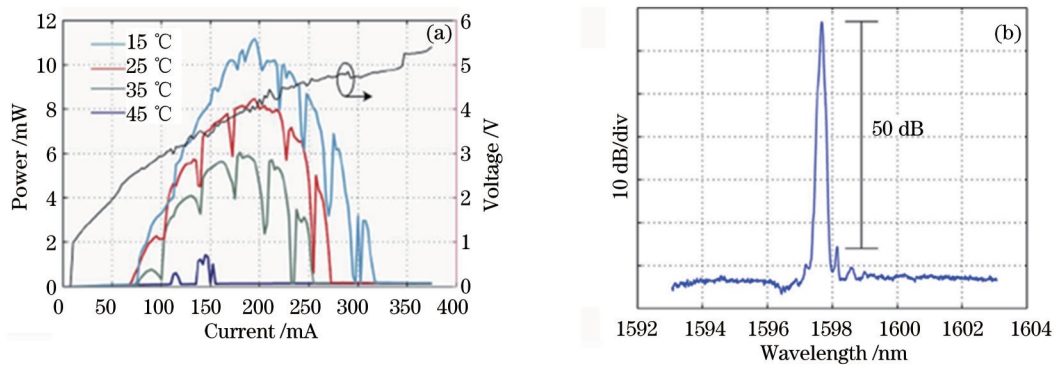


图7 (a) DBR-SEL在从前端镜面测量的各种温度下的 $L-I-V$ 曲线;(b)200 mA下DBR-SEL的激光谱

Fig.7 (a) DBR-SEL  $L-I-V$  curves for various temperatures measured out of the front mirror; (b) optical spectrum of the DBR-SEL driven at 200 mA

两个无源 DBR 反射镜放置在 SOI 硅波导的两端。该器件实现了阈值电流为 65 mA, 前端输出功率为 11 mW, 微分效率为 15%。200 mA 时激光波长 1597.5 nm, 边模抑制比为 50 dB。2012 年, 法国 CEA 公司报道了基于绝热模式转换的混合 Si/III-V 激光器<sup>[28]</sup>。基于倏逝波耦合结构的激光器通常只支持普通的光模, 即电磁场同时分布在 III-V 和下面的无源硅波导上。事实上, 大部分电磁场分布在硅波导上, 只有小部分与 III-V 量子阱有源区重叠, 这样便降低了模式增益。虽然这种倏逝波耦合结构激光器有优点, 但是因为它们在模式增益和输出耦合效率之间需要一个平衡, 所以不能有效利用 III-V 族材料。而基于绝热模式转换的结构中提出了一个基于两个波导耦合系统的超模式, 克服了上述的模式增益和输出耦合效率之间的平衡问题。其创新点在于超模式与增益区有较强的重叠, 且与下面的波导有很高的耦合效率。器件结构如图 8 所示, 其中的 F-P 腔由两个垂直重叠的波导组成, 两波导间由 100 nm SiO<sub>2</sub> 隔开。上面的波导为 InP/InGaAsP 基异质结构, 提供光增益。下面是 Si 波导系统, 由两个锥形的脊波导 (模式转换器) 和两个 DBR 组成。光学



腔由两个相隔  $1040\ \mu\text{m}$  的 DBR 来限定。前后 DBR 反射率分别为 90% 和 50%。模式转换器位于有源波导的下面,通过改变 Si 脊波导的宽度提供绝热传输。在器件中间部分,几乎所有的模场存在于 III-V 波导中,从而使模式有最大的增益。同时,在靠近 III-V 面的区域,模式转换器保证两层的充分耦合。图 8(c) 为有效折射率示意图,上面的 InGaAsP/InP 脊波导宽度为  $6\ \mu\text{m}$ ,硅波导的脊波导高度  $H$  和 slab 高度  $h$  分别为  $500\ \text{nm}$  和  $250\ \text{nm}$ 。模式的转换过程如图 9 所示,通过拓宽硅波导宽度来转换超模式能量。激光器工作温度为  $10\ ^\circ\text{C}\sim 85\ ^\circ\text{C}$ , 阈值电流为  $50\ \text{mA}$ ,  $15\ ^\circ\text{C}$  时最大输出功率为  $16.5\ \text{mW}$ , 微分量子效率为 11.8%,  $60\ ^\circ\text{C}$  时输出功率为  $1.5\ \text{mW}$ ,  $250\ \text{mA}$  激励下,多模激射,激射波长在  $1588\ \text{nm}$  附近。

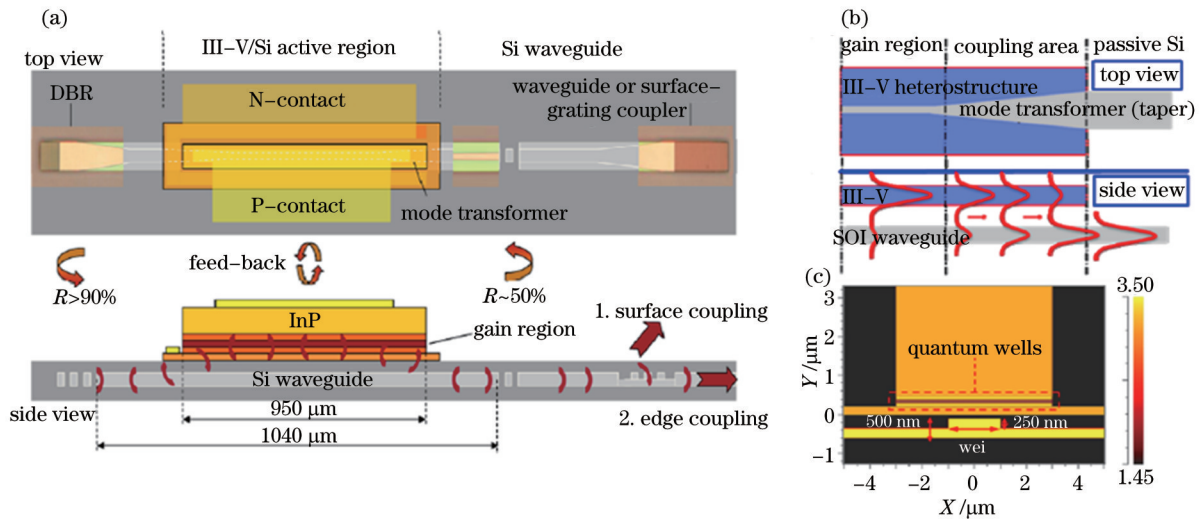


图 8 (a)混合 Si/III-V 激光器的显微镜照片示意图; (b)显示超模式传输过程的楔形结构的俯视和侧面图; (c)有效折射率剖面图

Fig.8 (a) Microscope image schematic of the hybrid Si/III-V laser; (b) top and side views of a taper showing the transfer of the supermode; (c) cross-section of the refractive index profile of the structure

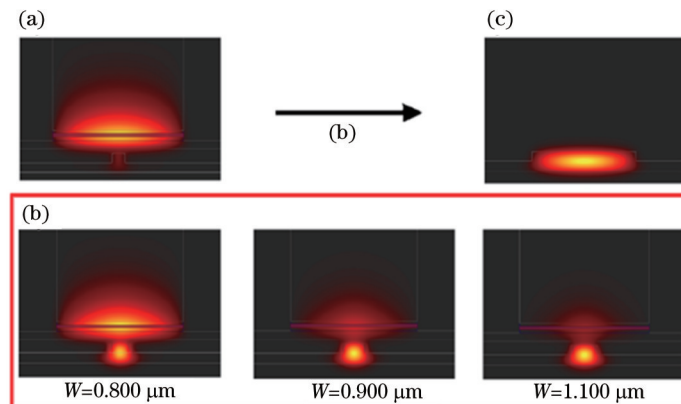


图 9 混合 F-P 腔中的激射超模式的演变过程。(a)结构中间部分的超模式形貌; (b)模式转换过程; (c)硅波导的基模

Fig. 9 Evolution of the lasing supermode inside the hybrid F-P cavity. (a) Supermode profile in the middle part of the structure; (b) mode transformer process; (c) fundamental mode of the Si waveguide

### 3.3 硅基混合集成微盘(环)激光器进展

对于光互连以及光子集成回路,小尺寸、低功耗和短腔设计很关键,像 F-P 腔混合硅激光器太大,不利于集成在小底座上,微盘激光器则能满足需求。自 1997 年起国际上就有很多小组在研究微盘激光器<sup>[29-30]</sup>。微盘激光器是一种结构非常简单的回音壁模式微腔激光器,可利用普通的边发射激光器外延片材料,采用半导体平面工艺制作<sup>[31-34]</sup>。2006 年,比利时根特大学与法国一所大学联合报道电抽运混合 Si/III-V 微盘激光器,只实现光抽运和脉冲激射<sup>[35]</sup>。2007 年,他们进一步实现了电抽运混合 Si/InP 微盘激光器<sup>[36]</sup>。器件结构如图 10 所示,对键合在 SOI 晶圆上的薄 InP 基有源层结构进行刻蚀,便形成一个微盘激光器。激光振荡通过倏逝波耦合到垂直放置在微盘边缘下方的 SOI 波导中。图 11 给出了器件性能,实现了阈值电流为

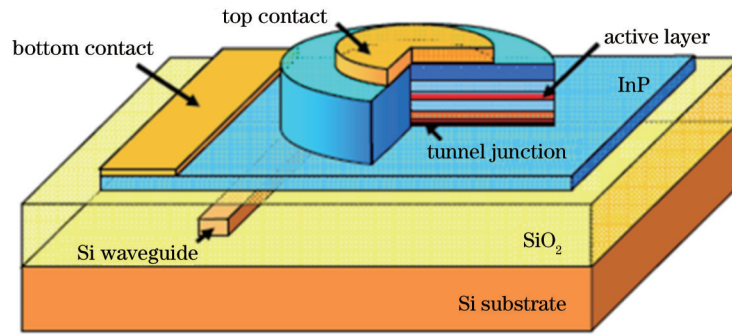


图10 混合集成微盘激光器结构示意图,包括微盘腔,SOI线波导,底部接触层,隧道结和金属接触层

Fig.10 Schematic drawing of the heterogeneous microdisk laser structure, showing the disk cavity, SOI wire waveguide, bottom contact layer, tunnel junction and metal contacts

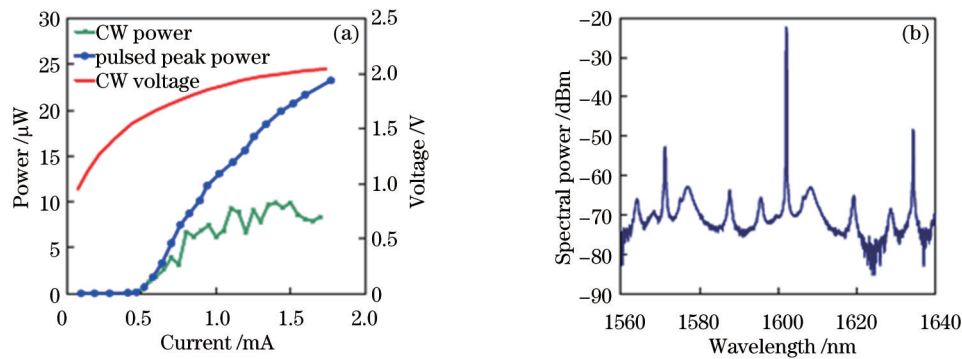


图11 (a) 20 °C下7.5 μm直径的微盘激光器激射特性;(b) 1.4 mA下连续波激射谱,对光纤耦合效率和片上传输损耗进行了归一化

Fig.11 (a) Lasing characteristics at 20 °C for a 7.5 μm disk; (b) continuous-wave lasing spectrum for 1.4 mA, normalized for the fiber-coupler efficiency and on-chip propagation loss

0.5 mA,单向斜率效率为30 μW/mA,连续激光最大输出功率为10 μW。

2009年,相关研究人员对混合Si/InP微盘激光器进行优化设计<sup>[37]</sup>。一个SOI波导放在III-V微盘激光器下面,垂直捕获一小部分的倏逝波。该微盘激光器III-V腔内的激光耦合到外面的硅波导,电子增益和光波模式有很好的重叠,阈值降低到了350 μA。

除了微盘激光器能满足小尺寸、低损耗外,微环激光器也能满足这方面的需求。2007年,UCSB和Intel公司共同研发出跑道环形混合AlGaInAs/Si激光器<sup>[38]</sup>。该器件结构如图12所示,该器件无需解理直波导和抛光形成F-P腔。图12(b)中,下面和上面的跑道直径分别为200 μm和100 μm。工作温度为60 °C时,1590 nm波长的激光最大输出功率高达29 W。

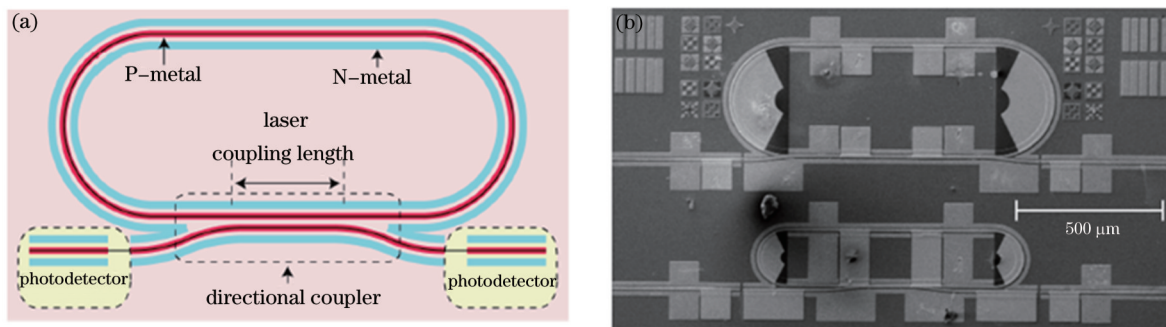


图12 (a)跑道环振荡器和光探测器的布局图;(b)两个跑道环激光器的俯视SEM图

Fig. 12 (a) Layout of the racetrack resonator and the photodetectors; (b) top view SEM image of two racetrack resonator lasers

2009年,UCSB报道了一种电抽运混合Si/InAlGaAs微环激光器<sup>[39]</sup>。器件结构如图13所示。图13(a)



中的激光器包含一个制作在硅盘上面的与硅盘直径相同的 III-V 环形振荡器,两个集成的锥形光探测器和通过束传播方法模拟的回音壁基模形貌图。同时标注了耦合间隙  $S$  和总线波导宽度  $W$ 。该器件在实验中测量得到了 2.5 GHz 的 3 dB 带宽。50  $\mu\text{m}$  直径的微环激光器的连续波阈值为 4 mA,输出功率为 3.5 mW。随后,UCSB 的相关研究人员对微环激光器进一步设计和优化<sup>[40]</sup>。2012年,UCSB 进一步研究了微环激光器的双稳特性,采用在硅波导一端集成无源反射器,实现了激光的单向激励<sup>[41]</sup>。然而,随着直径减小,热阻的增加能很快地降低器件性能,这是实现小型密集器件的最大障碍。

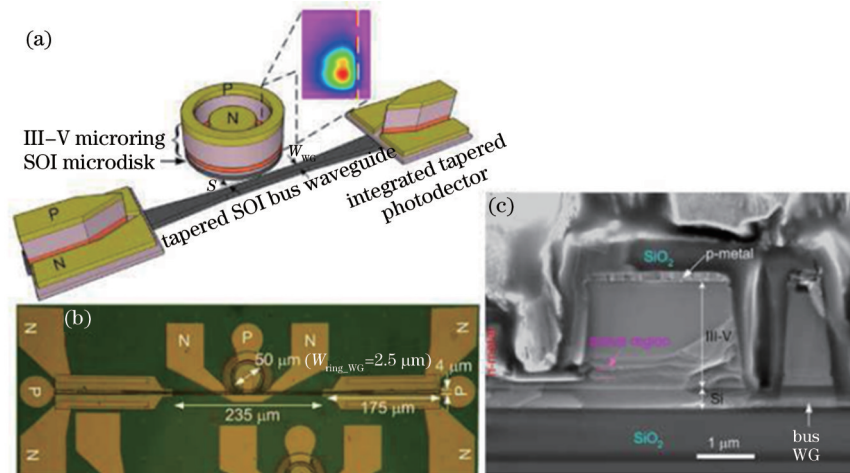


图 13 (a)紧凑型混合集成硅微环激光器的示意图;(b)标注了垂直维度的制备好的器件的显微镜照片;(c)消逝场点耦合器的剖面 SEM 图

Fig.13 (a) Schematic of the compact hybrid silicon ring resonator laser; (b) microscope image of the finished device with critical dimension labeled; (c) SEM cross-sectional image of the evanescent point coupler

### 3.4 硅基混合集成可调谐激光器进展

除了上述几种常见类型的硅基混合集成激光器,相关研究人员还制作了其他新型结构的硅基混合集成激光器。2012年,根特大学报道了单波长输出可调谐激光器<sup>[42]</sup>。边模抑制比大于 45 dB,20  $^{\circ}\text{C}$  下输出功率大于 10 mW,热光可调谐范围大于 8 nm,线宽为 1.7 MHz。2012年,法国阿尔卡特-朗讯贝尔实验室和泰利斯公司报道了混合硅单模可调谐激光器<sup>[43]</sup>。器件的调谐范围为 45 nm,边模抑制比为 40 dB。2013年,法国阿尔卡特-朗讯贝尔实验室与泰利斯公司报道了波长可选混合硅 AWG 激光器<sup>[44]</sup>。器件阈值电流为 40 mA,输出到单模光纤的最大功率为 2.2 dBm,5 波长通道间隔 392 GHz。2013年,美国 Aurrion 公司报道了应用于数据通信和电信的混合硅激光器<sup>[45]</sup>。用于电信的可调谐激光器,调谐范围在 20  $^{\circ}\text{C}$ 、90 mA 下大于 45 nm,边模抑制比大于 50 dB,输出功率大于 10 mW,效率大于 8.6%。用于数据通信的无需制冷的  $2 \times 8$  波分复用(WDM)激光器阵列,两排临近的 8 波长激光器阵列间隔 200 GHz,工作温度在 20  $^{\circ}\text{C}$ ~80  $^{\circ}\text{C}$  之间,边模抑制比大于 40 dB,输出功率大于 30 mW。该激光器性能首次与同质衬底激光器相比拟。

### 3.5 硅基混合集成人工微结构硅波导输出激光器的研究

笔者所在课题组设计的微结构 III-V/SOI 混合激光器的结构如图 14(a)所示。如图 14(b)所示,在 SOI 的顶层硅上形成了倏逝波条形硅波导,根据耦合效率其宽度为 1~3  $\mu\text{m}$ ,波导两边的沟槽宽度为 3  $\mu\text{m}$ 。倏逝波硅波导的中心部分存在均匀分布的多段式微结构,作为激光器的反馈腔。均匀分布的多段式微结构的功能类似于一个 DFB 或 DBR。然而,DFB 或 DBR 的周期是亚波长左右,而微结构空气槽的宽度和周期大于 1  $\mu\text{m}$ ,它可以通过标准光刻法来实现。有效折射率近似条件下,三维(3D)脊形波导降低为一个二维(2D)结构,如图 14(c)所示。

微结构 III-V/Si 混合激光器制作中,SOI 上顶层 Si 上的图形通过标准光刻以及 ICP 刻蚀来完成。图形形成于含有 2  $\mu\text{m}$  厚缓冲氧化层(BOX)的 Si 衬底的(100)面。本研究所制造图形化的顶部条形硅波导结构,其高度为 0.34  $\mu\text{m}$ ,宽度为 3  $\mu\text{m}$ 。在硅波导层,III-V 族层和多量子阱结构层的基本光学限制因子分别是 0.47, 0.53 和 0.0596。微结构的周期为 4~10  $\mu\text{m}$ ,槽的宽度为 1~2  $\mu\text{m}$ 。在 P 型层一侧,量子阱有源区边界上生长了

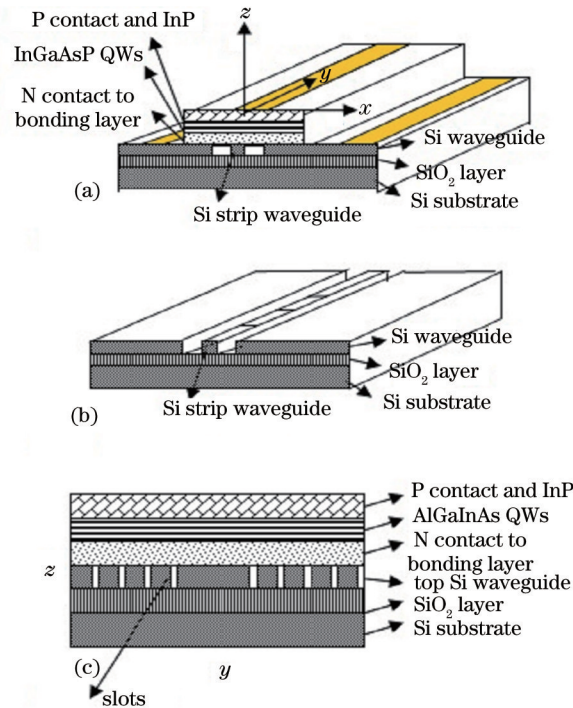


图 14 (a)三维结构示意图;(b)Si条形波导;(c)微槽的单模混合激光器  $y-z$  横截面

Fig.14 (a) Three-dimensional schematic structure; (b) Si strip waveguide; (c)  $y-z$  cross section of the slotted single-mode hybrid laser

分离限制异质结构(SCH)。超晶格区域用来抑制从键合层到量子阱区域的缺陷的传播。这一 III-V 族结构,通过低温晶片直接键合,然后转移到图形化 SOI 晶片上,其形成温度为 350 °C。最终制作完成的混合激光器横断面 SEM 如图 15(a)所示,不难发现,SOI 波导和 III-V 族材料之间的键合质量很好。电极焊盘分布如图 15(b)所示。激光器输出功率的测量在该器件的一端进行探测,图 16(a)所示的红外显微照片取自于测量设备的输出端面。图 16(b)是通过模拟所得到的模场分布的基本形状。图 17 中给出了激光的电流-电压( $I-V$ )特性。如图 17(b)所示,激光器的阈值电流为 100 mA,最大输出光功率为 0.85 mW,而斜率效率为 0.04 W/A。在电流为 130 mA 时,激光输出达到饱和。如图 17(b)所示,对于 0.03 占空比的脉冲注入而言,阈值电流为 95 mA,最高输出功率为 3.5 mW,而斜率效率为 0.063 W/A。 $I-V$ 特性与连续波(CW)下相同,微分电阻为 9 W,这是由横向注入引起的。图 18 中给出了激光器在连续波输出下的典型光谱图。电流为 135 mA 时,其激光波长为 1576.7 nm,边模抑制比为 25 dB。峰值波长还会随着注入电流的增加而发生红移。从实验结果中不难发现,微结构强烈地影响输出模式。

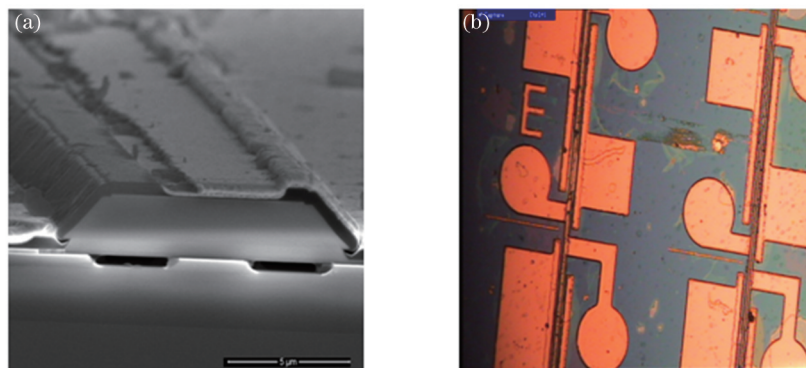


图 15 (a) III-V 族材料键合在 Si 条形波导下的 SEM 横截示意图;(b)电极分布示意图

Fig.15 (a) SEM of the cross-section of III-V material bonded on a Si strip waveguide; (b) electrode pad distribution

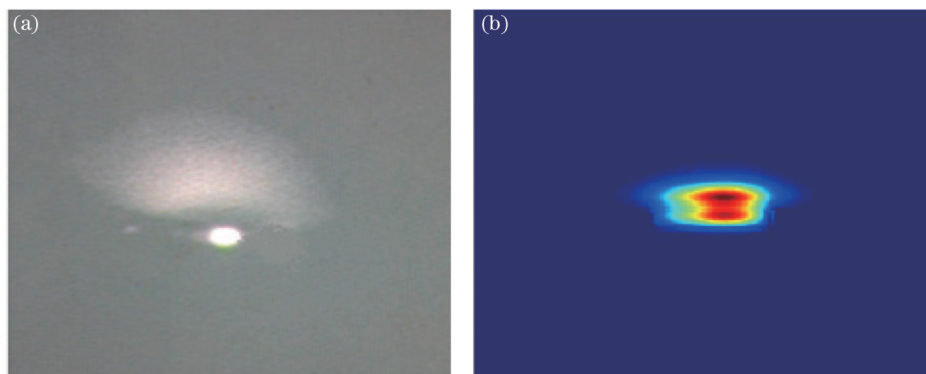


图16 (a)从器件一个端面所搜集的红外显微照片;(b)模拟得到的基本模场分布

Fig.16 (a) Infrared micrograph taken from an end facet of the devices; (b) calculated fundamental mode field distribution

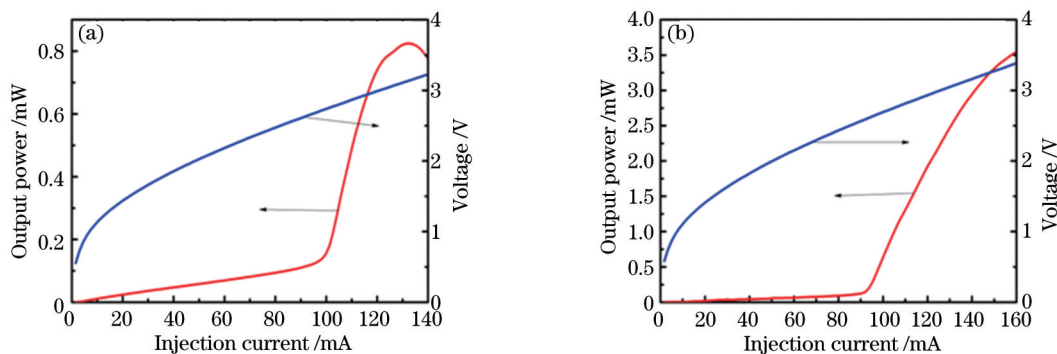


图17 光输出功率和电压相对于(a)连续及(b)脉冲注入电流的曲线

Fig.17 Measured light output power and voltage versus injection current. (a) Continuous injection current; (b) pulsed injection current

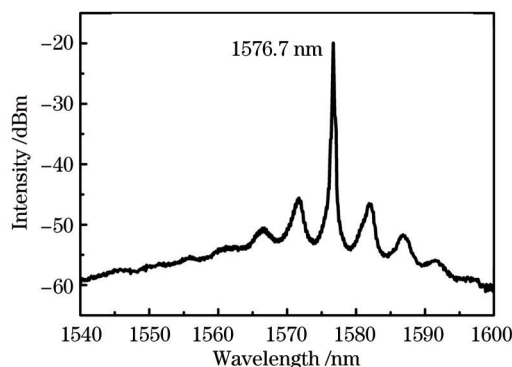


图18 135 mA下的光谱图

Fig.18 Spectrum at the injection current of 135 mA

#### 4 结束语

硅光子集成技术器件因其结构紧凑、性能稳定、可靠性好、成本低,可以满足大多数光通信系统、微电子系统的片内和片间互连的需求,因此硅基混合集成激光光源作为硅光子集成的最大技术难题,其研究变得尤为重要。本文综述了近年来硅基混合集成 III-V/Si 激光器的进展,介绍了本课题组的研究成果。本课题组提出了一种微结构硅基混合激光器,通过倏逝波耦合从硅波导输出。结果表明,引入微结构可以提供一种模式选择机制,实现单纵模。整个工艺过程不需要亚微米工艺,常规廉价设备即可解决,有利于低成本大批量生产。

#### 参考文献

- 1 H Rong, R Jones, A Liu, *et al.*. A continuous-wave Raman silicon laser [J]. *Nature*, 2005, 433(7027): 725-728.



- 2 S G Cloutier, P A Kosyrev, J Xu. Optical gain & stimulated emission in periodic nanopatterned crystalline silicon [J]. *Nature Materials*, 2005, 4(2): 887 – 891.
- 3 L Pavesi, L D Negro, C Mazzoleni, *et al.*. Optical gain in silicon nanocrystals [J]. *Nature*, 2000, 408(6811): 440–444.
- 4 A Irrera, D Pacifici. Electroluminescence properties of light emitting devices based on silicon nanocrystals [J]. *Physica E*, 2003, 16(5): 395–399.
- 5 D Liang, J E Bowers. Recent progress in lasers on silicon [J]. *Nat Photon*, 2010, 4(3): 511–517.
- 6 Wang Huayong, Xu Xingsheng. Research progress of photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 090003.  
王华勇, 许兴胜. 光子晶体垂直腔面发射激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 090003.
- 7 Zhou Zhiping, Gao Dingshan, Wang Yi, *et al.*. Progress on Si-based optoelectronic devices and integration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(2): 31–38.  
周治平, 郜定山, 汪毅, 等. 硅基集成光电子器件的新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(2): 31–38.
- 8 Wang Huolei, Kong Liang, Pan Jiaoqing, *et al.*. Recent progress of semiconductor mode-locked lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050001.  
王火雷, 孔亮, 潘教青, 等. 半导体锁模激光器的最新研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050001.
- 9 T Hong, Y Li, W Chen, *et al.*. Bonding InGaAsP/ITO/Si hybrid laser with ITO as cathode and light-coupling material [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2012, 24(7): 712–714.
- 10 A W Fang, H Park, O Cohen, *et al.*. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser [J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 9203–9210.
- 11 T Hong, G Ran, T Chen, *et al.*. A selective-area metal bonding InGaAsP-Si laser [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2010, 22(6): 1141–1143.
- 12 Q Y Lu, W H Guo, D Byrne, *et al.*. Design of slotted single-mode lasers suitable for photonic integration [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2010, 22(7): 787–789.
- 13 Y Zhang, H Qu, W Zheng, *et al.*. A hybrid silicon single mode laser with a slotted feedback structure [J]. *Opt Express*, 2013, 21(1): 877–883.
- 14 Y Zhang, H Wang, W Zheng, *et al.*. A slotted hybrid III-V/silicon single mode laser [J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2013, 25(7): 655–658.
- 15 Y Zhang, H Qu, W Zheng, *et al.*. A III-V/silicon hybrid racetrack ring single-mode laser with periodic microstructures [J]. *Opt Commun*, 2013, 301(3): 112–115.
- 16 Y Zhang, H Qu, W Zheng, *et al.*. Hybrid III-V/silicon single-mode laser with periodic microstructures [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(6): 842–844.
- 17 Y Zhang, H Wang, W Zheng, *et al.*. A hybrid silicon single-mode laser with a racetrack ring and periodic slots [J]. *Microwave and Optical Technology Letter*, 2013, 55(9): 2141–2143.
- 18 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.
- 19 D Liang, G Roelkens, R Baets, *et al.*. Hybrid integrated platforms for silicon photonics [J]. *Materials*, 2010, 3(3): 1782–1802.
- 20 H Park, A W Fang, S Kodama, *et al.*. Hybrid silicon evanescent laser fabricated with a silicon waveguide and III-V offset quantum wells [J]. *Opt Express*, 2005, 13(23): 9460–9464.
- 21 H Park. Design and fabrication of optically pumped hybrid silicon-AlGaInAs evanescent lasers [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12(6): 1657–1663.
- 22 A W Fang, H Park, O Cohen, *et al.*. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser [J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 9203–9210.
- 23 S Srinivasan, A W Fang, D Liang, *et al.*. Design of phase-shifted hybrid silicon distributed feedback lasers [J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9255–9261.
- 24 S Srinivasan, J E Bowers. Reliability of hybrid III-V on Si distributed feedback lasers [C]. *IEEE International Semiconductor Laser Conference*, 2012. 10–11.
- 25 A W Fang, E Lively, Y H Kuo, *et al.*. A distributed feedback silicon evanescent laser [J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4413–4419.

- 26 S Stankovic. Hybrid III-V/Si distributed-feedback laser based on adhesive bonding [J]. IEEE Photon Tech Lett 2012, 24 (23): 2155-2158.
- 27 A W Fang, B R Koch, R Jones, *et al.*. A distributed Bragg reflector silicon evanescent laser [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2008, 20(20): 1667-1669.
- 28 B B Bakir, A Descos, N Olivier, *et al.*. Hybrid silicon/III-V laser sources based on adiabatic mode transformers [C]. SPIE, 2012, 8264: 82640C.
- 29 T Baba, M Fujita, A Sakai, *et al.*. Lasing characteristics of GaInAsP-InP strained quantum-well microdisk injection lasers with diameter of 2~10  $\mu\text{m}$  [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1997, 9(7): 878-880.
- 30 C J Seung, K Djordjev, S J Choi, *et al.*. Microdisk lasers coupled to output waveguides [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(10): 1330-1332.
- 31 S L McCall, A F J Levi, R F Slusher, *et al.*. Whispering-gallery mode microdisk lasers [J]. Appl Phys Lett, 1992, 60(3): 289-291.
- 32 M Fujita, R Ushigome, T Baba. Continuous wave lasing in GaInAsP microdisk injection laser with threshold current of 40  $\mu\text{A}$  [J]. Electron Lett, 2000, 36(9): 790-791.
- 33 J V Campenhout, L Liu. A compact SOI-integrated multiwavelength laser source based on cascaded InP microdisks [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2008, 20(6): 1345-1347.
- 34 L Liu, T Spuesens, V Thourhout, *et al.*. A thermally tunable microdisk laser built on a III-V/Silicon-on-insulator heterogeneous integration platform [J]. IEEE Photon Tech Lett, 2010, 22(1): 1270-1271.
- 35 P Rojo Romeo, J Van Campenhout, P Regreny, *et al.*. Heterogeneous integration of electrically driven microdisk based laser sources for optical interconnects and photonic ICs [J]. Opt Express, 2006, 14(9): 3864-3871.
- 36 J Van Campenhout, P Rojo-Romeo, P Regreny, *et al.*. Electrically pumped InP-based microdisk laser integrated with a nanophotonic silicon-on-insulator waveguide circuit [J]. Opt Express, 2007, 15(11): 6744-6749.
- 37 T Spuesens, L Liu, T de Vries, *et al.*. Improved design of an InP-based microdisk laser heterogeneously integrated with SOI [C]. Proc 6<sup>th</sup> IEEE Int Conf Group IV Photon, 2009. 202-204.
- 38 A W Fang, R Jones, H Park, *et al.*. Integrated AlGaInAs-silicon evanescent race track laser and photodetector [J]. Opt Express, 2007, 15(5): 2315-2322.
- 39 D Liang, M Florentino, T Okumura, *et al.*. Electrically-pumped compact hybrid silicon microring lasers for optical interconnects [J]. Opt Express, 2009, 17(22): 20355 - 20364.
- 40 D Liang, M Florentino, S Srinivasan, *et al.*. Low threshold electrically-pumped hybrid silicon microring lasers [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2011, 17(6): 1528-1533.
- 41 D Liang, S Srinivasan, D A Fattal, *et al.*. Teardrop reflector-assisted unidirectional hybrid silicon microring lasers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(22): 1988-1990.
- 42 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.
- 43 A Le Liepvre, C Jany, A Accard, *et al.*. Widely wavelength tunable hybrid III - V/silicon laser with 45 nm tuning range fabricated using a wafer bonding technique [C]. IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics, 2012. 54-56.
- 44 A L Liepvre, A Accard, F Poingt, *et al.*. Wavelength selectable hybrid III-V/Si laser fabricated by wafer bonding [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(16): 1582-1585.
- 45 B R Koch, E J Norberg, B Kim, *et al.*. Integrated silicon photonic laser sources for telecom and datacom [C]. national Fiber Optic engineers Conference, 2013. PDP5C.8.