

硅基键合 InP-InGaAsP 量子阱连续激光器的研制*

于丽娟[†] 赵洪泉 杜云 李敬 黄永箴

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用键合技术在 Si 基上制备了 InP-InGaAsP 量子阱激光器, 实现了电注入室温连续工作. 采用低温直接键合的方法, 将 Si 衬底和 InP-InGaAsP 外延片键合在一起, 并制成条宽 $6\mu\text{m}$ 的脊波导边发射激光器. 室温连续工作的 $1.55\mu\text{m}$ 激光器阈值电流为 48mA , 对应的阈值电流密度和微分电阻分别为 $2.13\text{kA}/\text{cm}^2$ 和 5.8Ω , 在约 220mA 时输出光功率达 15mW .

关键词: 硅基激光器; 连续激光; 直接键合

PACC: 7340L; 8160C; 4255P

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)07-1117-04

1 引言

硅基光电子集成电路为光通信和光互连的发展提供了一种低成本的解决方案^[1,2]. Si 为间接带隙材料, 带间载流子复合发光效率要比直接带隙 III-V 族化合物材料低 3 个数量级, 不能由 Si 直接制作高效的发光器件. 虽然硅基光电器件已有很大的进步, 但硅基发光仍是阻碍硅基集成光电子发展的原因之一.

硅基发光主要有硅材料改性、喇曼放大两种实现方式. 通过硅材料改性实现硅基发光主要有纳米晶体硅^[3,4]、掺铈富硅二氧化硅^[5,6]和硅基异质量子结构^[7]等. 基于受激喇曼散射的光泵喇曼激光器^[8,9]已经由脉冲发展到连续, 但其缺点在于光注入. 硅基混合集成激光器通过异质结外延生长和键合技术来实现. 异质结外延生长^[10,11]虽然已经实现了硅基 InP 激光器的室温连续激光, 但位错密度大 ($>5 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$), 约是 InP 基晶格匹配外延生长位错密度的 10^4 倍, 且生长温度高 ($>550^\circ\text{C}$), 使得异质结外延生长用于硅基集成会导致器件退化严重. 键合技术可以集成晶格或晶向失配的材料, 充分利用键合材料的性能, 实现优势互补, 改善器件性能, 制造新型器件. 从原理上讲, 键合技术主要有引入中间层的键合和直接键合两种方式. 引入中间层的键合^[12]在键合界面引入金属或聚合物作中间层提高结合力, 但中间层的存在影响键合界面的光学或电学特性. 直接键合^[13,14]指不同材料经表面处理贴在一起, 依靠范德华力或者氢键作用形成化学键的连接,

并经过退火处理, 达到足够的强度. 直接键合特别是低温直接键合因为较低的退火温度, 克服了材料热膨胀系数不匹配的问题, 极大地拓展了光电子集成的自由度.

利用直接键合的方法制作硅基键合激光器是目前发展硅基光电子集成的热点之一, InP 基激光器的光发射波长对 Si 材料透明, Si 基键合 InP 基激光器引起了人们的重视^[15~18]. 在 Si 基键合 InP 激光器中, Si 作衬底为 InP 基激光器与 Si 大规模集成电路的集成提供平台, 另外 Si 的导热性能优于 InP, 有利于激光器散热. 键合时退火温度较高 ($>500^\circ\text{C}$)^[15,16]会造成缺陷数量的增加; 在较低的退火温度下采用键合工艺, 制备了 Si 基 $1.3\mu\text{m}$ InP-InGaAsP 边发射激光器^[18,19], 在条宽为 $6\mu\text{m}$ 、腔长为 $300\mu\text{m}$ 时, 阈值电流和相应的电流密度分别为 36mA 和 $2\text{kA}/\text{cm}^2$. 最近, 还发展了新颖的 Si 和 InP 基有源区的集成方式^[20~22], AlGaInAs 量子阱有源区提供激光器的增益, SOI 上的 Si 波导作为激光器的谐振腔; Si 和 InP 键合后制作出混合激光器, 实现了 $1.55\mu\text{m}$ 激光, 其阈值电流为 65mA , 最大输出功率 1.8mW ; 键合前波导和 III-V 有源区无需对准^[23]. 我们已经利用亲水性低温直接键合的方法制备出条宽 $20\mu\text{m}$ 的 Si 基 InP-InGaAsP 激光器, 实现了电注入室温脉冲激光^[24]. 本文采用低温亲水性键合, 实现了 Si 和 InP 键合, 制作了条宽 $6\mu\text{m}$ 的条形脊波导 Si 基 InP-InGaAsP 量子阱激光器. 室温连续工作的 $1.55\mu\text{m}$ 激光器阈值电流为 48mA , 对应的阈值电流密度和微分电阻分别为 $2.13\text{kA}/\text{cm}^2$ 和 5.8Ω .

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2003AA312010)和国家自然科学基金(批准号:60576035)资助项目

[†] 通信作者. Email: ylj@semi.ac.cn

2006-12-08 收到, 2007-03-01 定稿

2 直接键合技术

直接键合界面分别为 n-Si 和 n-InP. InP 外延片材料组成是在 p 型 InP(100) 上用 MOCVD 技术依次生长下列各层: $0.2\mu\text{m}$ 的 p-InGaAs 欧姆接触层, $1.5\mu\text{m}$ 的 p-InP 包层, $0.12\mu\text{m}$ 的 SCH, InGaAsP 量子阱层, $0.12\mu\text{m}$ 的 SCH, $0.1\mu\text{m}$ 的 n-InP 包层, $0.2\mu\text{m}$ 的 n-InGaAsP 刻蚀阻挡层和 $1.5\mu\text{m}$ 的 n-InP 键合界面层. 其中, 量子阱层包含 6 对 0.2% 压应变 InGaAsP 量子阱, 阱层为 6nm 厚的 $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}_{0.92}\text{P}_{0.08}$, 垒层为 6nm 厚的 $\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.77}\text{As}_{0.52}\text{P}_{0.48}$.

键合工艺采用亲水性低温键合的方法, 即在清洗之后预键合, 然后低温退火. (1) 清洗: 清洗遵循的工艺原理是分别去除 InP 和 Si 表面覆盖的疏水性有机物, 去除表面杂质离子、除碳并进行亲水性处理. 对于 Si 晶片, 用甲苯、丙酮、乙醇煮洗 2 遍, 用改进的 RCA1 溶液 ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=0.25:1:5$) 在 75°C 下煮洗 $10\sim 20\text{min}$, 用大量的去离子水冲洗. 对于 InP 晶片, 用去离子水煮洗, 然后超声清洗, 以初步去除表面大颗粒杂质, 用乙醇、丙酮、三氯乙烯、四氯化碳反复煮洗 3 遍, 以去除有机杂质离子, 去离子水反复冲洗, 用 $1\text{vol}\%$ HF 在 25°C 下处理 $10\sim 15\text{min}$, 除去表面氧化物, 用去离子水超声清洗, 用 $\text{D.I. H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2=5:1$ 煮洗 2 遍, 除碳并形成很薄的氧化层. (2) 预键合: 将清洗后的 InP 和 Si 置于同一容器内, 在去离子水中将两晶片贴合, 并对准晶向, 以便于解理, 贴合晶片在干燥箱内进行数小时的低温预键合 ($70\sim 90^\circ\text{C}$). (3) 退火: 预键合后的晶片置于键合机内, 以 $0.1\sim 0.3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率缓慢加热, 升温至 $150\sim 160^\circ\text{C}$, 在此期间施加 $10\sim 40\text{N}/\text{cm}^2$ 左右的压力; 以 $0.3\sim 0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 250°C , 并保温 3h ; 最后升温至 400°C , 升温速率为 $0.5\sim 0.7^\circ\text{C}/\text{min}$, 保温 0.5h .

3 激光器的结构与制作

键合后将晶片减薄, 湿法腐蚀去掉 InP 衬底, 得到 Si 晶片上厚约 $6\mu\text{m}$ 的外延层. 经过清洗、掩膜和腐蚀, 形成 $6\mu\text{m}$ 宽的脊型波导. 在晶片表面化学气相沉积 (CVD) SiO_2 掩膜层, 甩胶后在原来的脊上再光刻, 反型并去掉脊上的胶, 腐蚀掉脊上的 SiO_2 , 去除其余部分的胶, 在脊波导上蒸镀 TiAu 合金, 形成 p 型电极. 然后, 用条宽覆盖脊波导的宽条光刻, 光刻并腐蚀到有源层以下 n-InGaAsP 以上, 清洗后蒸镀 AuGeNi 合金, 制成 n 型电极. 继续光刻, 将 n 面以外的 AuGeNi 合金层腐蚀掉. 将 n-Si 衬底减薄至

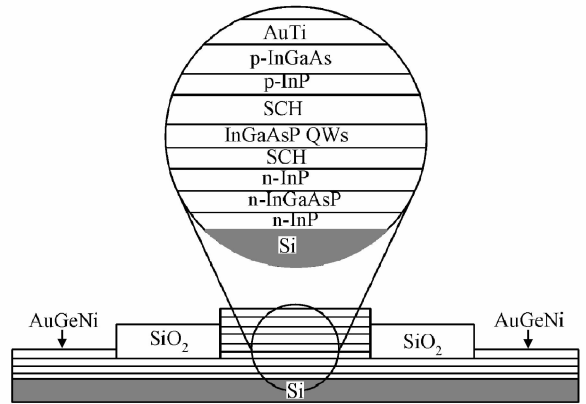


图 1 Si 基激光器结构示意图

Fig. 1 Cross section device structure of Si bonded to InP-InGaAsP QWs laser

$60\sim 80\mu\text{m}$, 采用分别解理的方法形成激光器腔面, 即先解理 InP 层, 再解理 Si 基板. 最后制得条宽 $6\mu\text{m}$ 、腔长 $375\mu\text{m}$ 的脊波导 Si 基 InP-InGaAsP 量子阱激光器. 激光器的结构如图 1 所示; 激光器的端面扫描电镜照片如图 2 所示. 图 2 中的白色亮线为 Si 和 InP 的键合界面, 可以清楚地看到 Si 和 InP 层分为两部分, 两部分之间形成紧密的结合.

4 激光器性能测试与分析

对所制备的 Si 基边发射激光器进行阈值电流和激光谱等性能的测试. 测得室温连续条件下光功率-电流和伏-安特性曲线如图 3 所示. Si 基边发射激光器阈值电流为 48mA , 斜率效率为 $0.08\text{W}/\text{A}$, 在注入电流约 220mA 时, 输出功率可达 15mW ; 由图 3 还可以估算出, 在阈值电流附近, 激光器的微分电阻为 5.8Ω . 变温阈值电流变化曲线如图 4 所示, 激光器在 $250\sim 300\text{K}$ 比在 $180\sim 250\text{K}$ 时的阈值电流变化显著. 由阈值电流变化与温度的关系 $I_{\text{th}}(T) = I_{\text{th}}(T_r)\exp\left(\frac{T-T_r}{T_0}\right)$, 可求出特征温度 T_0 , $180\sim 220\text{K}$ 的 T_0 约为 159K , 室温 $294\sim 300\text{K}$ 的 T_0 约为 44K .

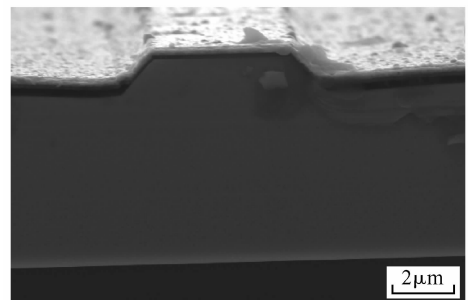


图 2 Si 基激光器端面的 SEM 照片

Fig. 2 A SEM cross section image of a Si-based laser

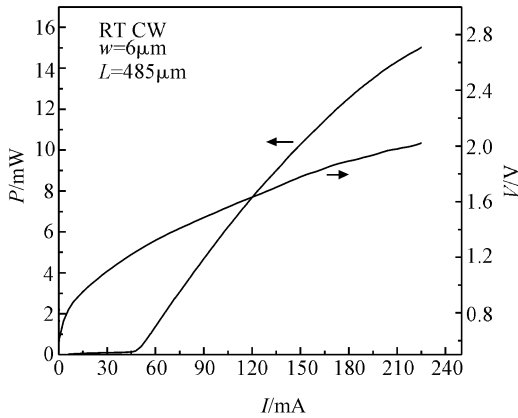


图 3 Si 基激光器光功率-电流和伏安特性曲线

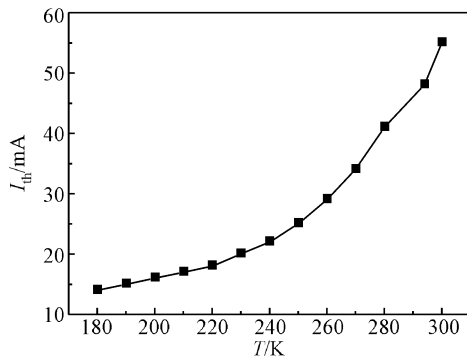
Fig. 3 P - I curve and V - I curve of Si-based laser

图 4 Si 基激光器变温阈值电流变化

Fig. 4 Threshold current of Si-based laser with temperature

用 Agilent-86142B 光谱仪测试激光器室温下连续注入电流的激射谱. 光谱仪分辨率取为 0.2nm, 注入电流 65mA, 测得其激射光谱特性如图 5 所示. 激光器的中心波长为 1547nm, 纵模间隔为 0.901nm, 根据纵模间隔公式 $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_g L}$, 可以求出群折射率 n_g 为 3.54.

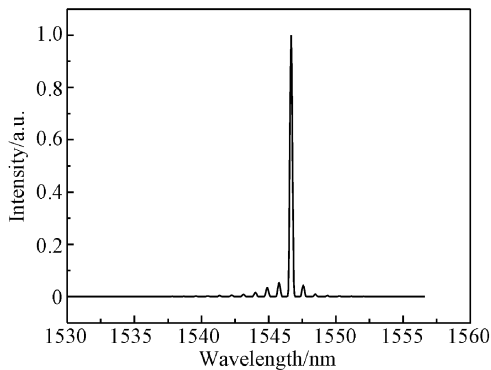


图 5 Si 基激光器激射光谱特性曲线

Fig. 5 Emission spectrum of Si-based laser

5 结论

采用低温键合的方法在 Si 基上制备出室温连续激射的边发射激光器. 室温连续工作的条宽 6 μ m、中心波长 1.55 μ m 的激光器阈值电流为 48mA, 对应的阈值电流密度和微分电阻分别为 2.13kA/cm² 和 5.8 Ω , 在注入电流约 220mA 时, 输出功率可达 15mW. 从实验结果看, 采用键合工艺可以实现 InP 基激光器和 Si 基的集成; 但在器件制备过程中需要降低键合温度, 并进一步改进晶向对准工艺, 同时需要优化器件结构的设计, 实现 Si 基发光混合激光器.

致谢 感谢胡永红博士研究生在激光器性能测试方面的指导和帮助.

参考文献

- [1] Reed G T. The optical age of silicon. *Nature*, 2004, 427: 615
- [2] Miller D A B. Optical interconnects to silicon. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1312
- [3] Pavesi L, Dal Negro L, Mazzoleni C, et al. Optical gain in silicon nanocrystals. *Nature*, 2000, 408: 440
- [4] Wang X X, Zhang J G, Ding L, et al. Origin and evolution of the photoluminescence from Si nanocrystals embedded in SiO₂ matrix. *Phys Rev B*, 2005, 72: 195313
- [5] Kik P G, Brongersma M L, Polman A. Strong exciton-erbium coupling in Si nanocrystal-doped SiO₂. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(17): 2325
- [6] Han H S, Seo S Y, Shin J H. Optical gain at 1.54 μ m in erbium-doped nanocluster sensitized waveguide. *Appl Phys Lett*, 2001, 79(27): 4568
- [7] Dehlinger G, Diehl L, Gennser U, et al. Intersubband electroluminescence from silicon-based quantum cascade structures. *Science*, 2000, 290: 2277
- [8] Rong H. A continuous-wave Raman silicon laser. *Nature*, 2005, 433: 725
- [9] Boyraz O, Jalali B. Demonstration of a silicon Raman laser. *Optics Express*, 2004, 12(21): 5269
- [10] Razeghi M, Defour M, Blondeau R, et al. First CW operation of GaInAsP-InP laser on a silicon substrate. *Appl Phys Lett*, 1988, 53(24): 2389
- [11] Sugo M, Mori H, Tachikawa M, et al. Room-temperature operation of a GaInAsP double-heterostructure laser emitting at 1.55 μ m on a silicon substrate. *Appl Phys Lett*, 1990, 57(6): 593
- [12] Shieh C L, Chi J Y, Armiento C A, et al. 1.3 μ m InGaAsP ridge waveguide laser on GaAs and silicon substrates by thin-film transfer. *Electron Lett*, 1991, 27(10): 850
- [13] Zhu Z H, Ejeckam F E, Qian Y, et al. Wafer bonding technology and its applications in optoelectronic devices and materials. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1997, 3(3): 927
- [14] Pasquariello D, Hjort K. Plasma-assisted InP-to-Si low temperature wafer bonding. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(1): 118

- [15] Lo Y H, Bhat R, Hwang D M, et al. Semiconductor lasers on Si substrates using the technology of bonding by atomic rearrangement. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(10):1038
- [16] Mori K, Tokutome K, Nishi K, et al. High-quality InGaAsP/InP multiquantum-well structures on Si fabricated by direct bonding. *Electron Lett*, 1994, 30(12):1008
- [17] Wada H, Takamori T, Kamijoh T. Room-temperature photopumped operation of 1.58 μm vertical-cavity lasers on Si substrate using wafer bonding. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(11):1426
- [18] Wada H, Kamijoh T. Room-temperature CW operation of InGaAsP lasers on Si fabricated by wafer bonding. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(2):173
- [19] Wada H, Kamijoh T. 1.3 μm InP-InGaAsP lasers fabricated on Si substrates by wafer bonding. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1997, 3(3):937
- [20] Park H, Fang A W, Kodama S, et al. Hybrid silicon evanescent laser fabricated with a silicon waveguide and III-V offset quantum wells. *Optics Express*, 2005, 13(23):9460
- [21] Fang A W, Park H, Jones R, et al. A continuous-wave hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2006, 18(10):1143
- [22] Maruyama T, Okumura T, Arai S. Direct wafer bonding of GaInAsP/InP membrane structure on silicon-on-insulator substrate. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45(11):8717
- [23] Fang A W, Park H, Cohen O, et al. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser. *Optics Express*, 2006, 14(20):9203
- [24] Yu Lijuan, Zhao Hongquan, Du Yun, et al. 1.55 μm InP-InGaAsP quantum-well lasers fabricated on Si substrates by wafer bonding. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(4):741 (in Chinese) [于丽娟, 赵洪泉, 杜云, 等. 键合法制备硅基 1.55 μm InP-InGaAsP 量子阱激光器. *半导体学报*, 2006, 27(4):741]

CW InP-InGaAsP Quantum-Well Laser on Si Fabricated by Wafer Bonding*

Yu Lijuan[†], Zhao Hongquan, Du Yun, Li Jing, and Huang Yongzhen

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

Abstract: A 1.55 μm InP-InGaAsP quantum-well laser was fabricated on Si substrate by low-temperature wafer bonding, which lases at room temperature with electrical pumping. The InP epitaxy was designed and grown by MOCVD, then bonded to Si wafer. Finally, the laser with ridge-waveguide and edge-emission was fabricated. This laser runs continuous-wave with a threshold current of 48mA (current density of 1.65kA/cm²), differential resistance of 5.8 Ω at the threshold current, and a maximum output power of 15mW at 220mA.

Key words: Si-based laser; continuous-wave lasing; wafer bonding

PACC: 7340L; 8160C; 4255P

Article ID: 0253-4177(2007)07-1117-04

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA312010) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60576085)

[†] Corresponding author. Email: ylj@semi.ac.cn

Received 8 December 2006, revised manuscript received 1 March 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics