

键合法制备硅基 $1.55\mu\text{m}$ InP-InGaAsP 量子阱激光器*

于丽娟[†] 赵洪泉 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实验室, 北京 100083)

摘要: 在硅基上成功地制备出了 $1.55\mu\text{m}$ InP-InGaAsP 量子阱激光器. 设计并生长了适合于键合的量子阱激光器结构材料, 通过直接键合技术, 将 Si 衬底与 InP-InGaAsP 外延片键合到一起. 剥离去掉 InP 衬底后, 在 $5\sim 6\mu\text{m}$ 的薄膜上制备出 $20\mu\text{m}$ 条形边发射激光器. 室温下, 阈值电流 160mA (电流密度为 $2.7\text{kA}/\text{cm}^2$), 功率可达 10mW 以上 (在约 350mA 电流下), 实现了 $1.55\mu\text{m}$ 长波长边发射激光器与 Si 的集成. 目前, 该结果国际上还未见报道.

关键词: 直接键合; 长波长激光器; 硅基

PACC: 7340L; 7360F; 7850G

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)04-0741-03

1 引言

硅大规模集成电路 (LSI) 芯片间的光互连, 已经引起了人们的极大的兴趣^[1~3], 为此, III-V 族光电器件与硅的集成已得到广泛的研究, 而 InP-InGaAsP 激光器是非常有吸引力的光源. 因为 InP-InGaAsP 激光器的光发射波长对 Si 材料是透明的, 因此实现硅与 InP 材料的集成对于实现高效光电集成有着特别重要的意义.

InP 基激光器与 Si 的集成可用金属键合^[4]、异质结外延^[5,6]和直接键合技术^[7,8]等几种方法来实现: 用金属键合虽然是最直接的方法, 但是它不适合垂直光互连, 因为金属干扰了光的传播. 晶格失配异质外延也有广泛的研究, 而且已经制备出室温连续工作的 InP 激光器, 但是, 硅和 InP 的晶格间存在 8.1% 的失配, 对于生长出好的材料造成很大的困难, 而且, 由于外延温度过高 (550°C 以上), 将对集成芯片的性能产生影响, 因而直接键合技术是最有希望的选择, 这种技术就是使两种不同材料的晶片在中间不添加任何材料的情况下粘贴起来. 目前, 在较低温度下, 通过两个晶片表面的范德瓦尔斯力或表面氢键已经可以实现键合, 并用键合后的晶片制备出了 Si 基 $1.3\mu\text{m}$ GaInAsP-InP 边发射激光器^[8]. 该激光器条宽为 $6\mu\text{m}$ 、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 $2\text{kA}/\text{cm}^2$, 斜率效率为 $0.25\text{W}/\text{A}$. 本文报道了 InP 基量子阱激光器的设计与生长以及 InP 与 Si 的直接键合技术. 并报道制备出了条宽 $20\mu\text{m}$ 、波长 $1.55\mu\text{m}$ GaInAsP-InP 边发射激光器, 腔

长 $300\mu\text{m}$, 阈值电流和电流密度分别为 160mA 和 $2.7\text{kA}/\text{cm}^2$, 串联电阻为 2.78Ω , 斜率效率为 $0.06\text{mW}/\text{mA}$. 通过键合技术我们已经得到了质量较好的材料, 实现了 $1.55\mu\text{m}$ 长波长边发射激光器与 Si 的集成.

2 实验

2.1 InP 基量子阱激光器的设计与生长

为了实现 Si 与 InP 基材料的集成, 我们对 Si 基长波长边发射激光器进行了研究, 根据 Si 与 InP 基材料键合的特点以及对 InP 基量子阱激光器的要求, 我们设计了适于键合用的激光器的材料结构, 其结构示意图如图 1 所示, 依次在 n 型 (100) 衬底上首先生长出 $1\mu\text{m}$ 的低掺杂浓度 p-InP 层; 接着生长厚度为 $0.1\mu\text{m}$ 的 p-InGaAs; $3\mu\text{m}$ 的高掺杂浓度 p-InP 层; $0.12\mu\text{m}$ 的 GaInAsP 上限制层; 长波长量子阱层, 再生长 $0.12\mu\text{m}$ 的 GaInAsP 下限制层; 最后生长 $3\mu\text{m}$ 的高掺杂浓度 n-InP 层. 通过 AFM 测试, 我们发现生长后的晶片表面粗糙度可达到 0.4nm , 完全满足的键合要求.

2.2 直接键合工艺

首先, 用 H_2SO_4 在室温下漂洗 InP 结构片 30s , 然后用大量水冲洗. 用改进的 RCA1 在 75°C 下煮 Si 片 15min , 去离子水冲洗, 再经亲水处理, 然后大量水冲洗. 将上述清洗好的片子放入一个特定的容器中, 进一步超声清洗 10min , 在去离子水中, 将两个

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2003AA312010)

[†] 通信作者. Email: ylj@red.semi.ac.cn

2005-09-26 收到, 2005-12-20 定稿

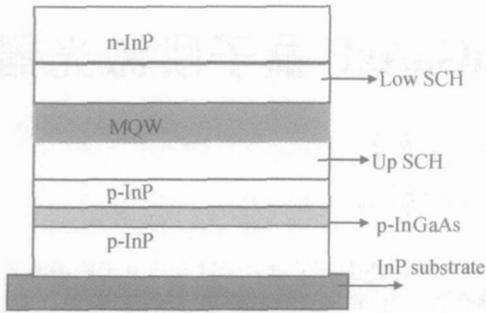


图 1 激光器材料结构示意图

Fig. 1 Sketch map of laser material structure

片子的解理面对齐,进行预键合,取出后放入恒温箱中,90 以下保温 4 ~ 5h,取出放入自制的温度、压力可调控的键合机中,逐渐加温加压,最后调至 400 和 3kg/cm²,4h 后取出,键合完毕.

2.3 激光器的设计与制备

对键合好的晶片进行机械和化学减薄,剥离掉 InP 衬底,最后 Si 片上只剩下 6 ~ 7μm 的薄膜,按照我们设计的共面边发射激光器结构(如图 2 所示),在这个薄膜上,经过多次掩膜、光刻、湿法化学腐蚀形成 20μm 脊型波导的 p, n 电极准共面边发射激光器.对于这两种材料键合形成的器件,在解理过程中,我们采用解理 Si 衬底的方法,分割成独立的器件,形成腔长 300μm 左右的边发射激光器.

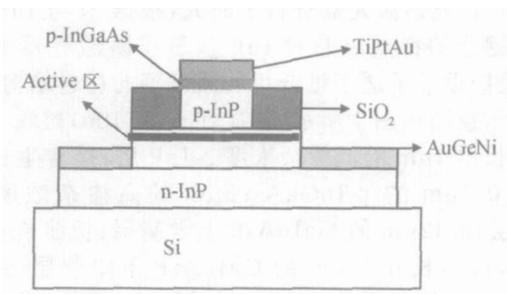


图 2 激光器结构示意图

Fig. 2 Sketch map of InP-InGaAsP quantum well laser bonded on Si

3 器件的性能测试与分析

对制备好的腔长 300μm 的 Si 基长波长边发射激光器进行了性能测试,图 3 是用半导体参数测试系统,在室温脉冲条件下(脉宽 2μs,重复频率 1000Hz,占空比为 0.2%),测得的光功率-电流曲线.从图中可以看到,Si 基长波长边发射激光器已实现室温激射,腔长 300μm 的激光器,阈值电流约

160mA,输出功率可达 10mW(约在 350mA 下),斜率效率达到 7.5%.图 4 是用同一设备测得的激光器伏-安特性曲线,根据曲线可以估算出器件的串联电阻约为 2.78.我们用安捷伦-86142B 光谱分析仪在脉冲条件下(脉宽 100μs,重复频率 800Hz)和工作电流 240mA 的情况下,测得了激光器激光光谱特性,它的输出光中心波长为 1.55μm.

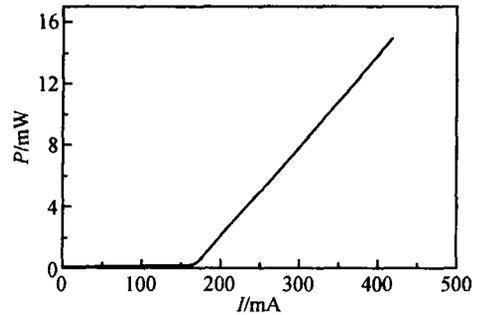


图 3 硅基长波长边发射激光器光功率-电流曲线

Fig. 3 A typical P-I curve of the long wavelength laser based on Si

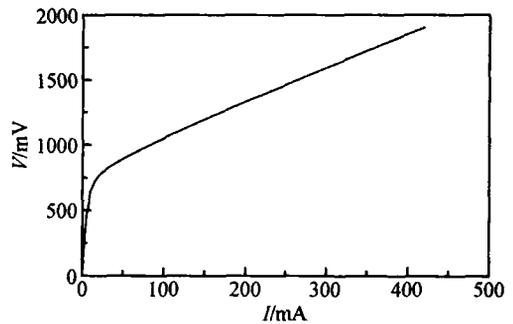


图 4 硅基长波长边发射激光器伏-安特性曲线

Fig. 4 I-V curve of the long wavelength laser based on Si

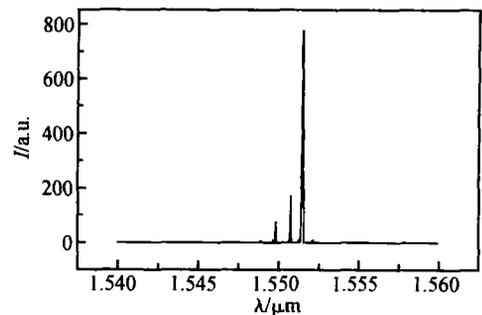


图 5 硅基长波长边发射激光器的激光谱

Fig. 5 Emission spectrum of the long wavelength laser based on Si

4 结论

采用键合的方法制备出性能良好的硅基长波长激光器. 从测试结果可以看到, 该激光器的阈值电流为 160mA, 在注入电流 350mA 时, 输出功率可达 10mW, 斜率效率达到 7.5%. 但器件的串联电阻较大(约 2.78 Ω), 这是准共面电极边发射激光器的一个缺点. 原因可能是由于正负电极间的通道距离较大所致, 另外, 硅基长波长激光器在制备过程中, 还存在着腔面的解理问题, 这些都是我们在下一步实验中需要改进的. 从实验结果看, 将键合技术用于光电子器件与硅的集成是非常有希望的技术.

参考文献

- [1] Goodman J W, Leonberger F J, Kung S Y, et al. Optical interconnections for VLSI systems. Proc IEEE, 1984, 72(7): 850
 [2] Koyanagi M, Takata H, Mori H, et al. Design of 4-k bit \times 4-

layer optically coupled three-dimensional common memory for parallel processor system. IEEE J Solid-State Circuits, 1990, 25(1): 109

- [3] Hayashi I. Optoelectronic devices and material technologies for photoelectronic integrated systems. Jpn J Appl Phys, 1993, 32(1B): 266
 [4] Shieh C L, Chi J Y, Armiento C A, et al. 1.3 μm InGaAsP ridge waveguide laser on GaAs and silicon substrates by thin-film transfer. Electron Lett, 1991, 27(11): 850
 [5] 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
 [6] Sugo M, Mori H, Tachikawa M, et al. Room-temperature operation of an GaInAsP double-heterostructure laser emitting at 1.55 μm on a silicon substrate. Appl Phys Lett, 1990, 57(6): 593
 [7] Wada Hiroshi, Kamijoh Tadeshi. Room-temperature CW operation of GaInAsP-InP lasers on Si fabricated by wafer bonding. IEEE Photonics Technol Lett, 1996, 8: 173
 [8] Wada Hiroshi, Kamijoh Tadeshi. 1.3 μm GaInAsP-InP lasers fabricated on a silicon substrates by wafer bonding. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 1997, 3(3): 937

1.55 μm InP-InGaAsP Quantum-Well Lasers Fabricated on Si Substrates by Wafer Bonding*

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

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

Abstract: 1.55 μm InP-InGaAsP quantum-well lasers are fabricated on Si substrates by wafer bonding. The laser structures are designed and grown by MOCVD and bonded to Si wafers. The laser are then fabricated on the bonded thin films. Room-temperature operation is achieved for 20 μm -wide mesa lasers with a threshold current of 160mA and an output power of 10mW at 350mA.

Key words: wafer bonding; long-wavelength laser; Si substrate

PACC: 7340L; 7360F; 7850G

Article ID: 0253-4177(2006)04-0741-03

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

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

Received 26 September 2005, revised manuscript received 20 December 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics