

键合方法制备长波长面发射的实验和分析*

何国荣[†] 郑婉华 渠红伟 杨国华 王青 吴旭明 曹玉莲 陈良惠

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 通过疏水键合方法实现了 InGaAsP/InP 有源区与 GaAs/AlAs DBR 的单面和双面键合, 并通过 SEM, *I-V* 曲线和反射谱、光致发光谱等手段研究了 GaAs/InP 键合界面的机械、光学和电学性质, 良好的界面性质为使用键合技术制备长波长面发射激光器提供了可能性.

关键词: 键合; 面发射激光器; 光致发光谱

EEACC: 2520D; 4320J

中图分类号: O485 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2007)03-0444-04

1 引言

近红外的长波长面发射激光器(VCSEL)由于其动态单模、低阈值特性、便于耦合和大规模集成等优势在光通信、光互连上有着重要的应用, InP/InGaAsP 材料系是这个波段最常用的有源区材料. 传统方法制备连续激射的 InGaAsP/InP VCSEL 的一个很大的困难在于 DBR 的电阻和热阻太大, 而与 InP 晶格匹配的 InP/InGaAsP, AlGaInAs/AlInAs 反射镜由于折射率差较小, 为达到 99% 以上的反射率需要较多对数的 DBR, 这不仅使得电阻和光吸收增加, 也给材料生长提出了很高的要求. 且三元和四元材料热导性较差, 这都会直接导致 VCSEL 性能恶化.

采用键合方法可以较好地解决上述问题, 通过将折射率差较大、热导性能较好的 GaAs/AlAs DBR 与 InGaAsP 有源区键合, 可以有效地改善激光器的电、热特性, 从而实现低阈值、高温连续工作 VCSEL. 美国加州大学和 Cornell 大学等^[1~3] 都对键合方法制备长波长 VCSEL 做了多年的研究, 并于 2003 年通过双面键合实现了 1.3 μm 大功率的 VCSEL, 最高工作温度可达 132 $^{\circ}\text{C}$ ^[4].

键合制备 VCSEL 可以采用单面键合, 也可采用双面键合技术. 单面键合技术将 GaAs/AlAs DBR 与 InGaAsP 有源区键合, 然后以介质膜作为上 DBR 制备 VCSEL, n-GaAs/n-InP 键合界面特性对 VCSEL 性质有非常重要的影响. 双面键合技术将 n-GaAs/AlAs DBR 与 InGaAsP 有源区键合, 然后将衬底和腐蚀停止层去除, 再将有源区与 p-GaAs/AlAs DBR 键合, n-GaAs/n-InP 和 p-GaAs/

p-InP 键合界面都对 VCSEL 的性能有重要影响.

由于键合界面光学性质和电学性质对 VCSEL 性能有重要影响, 本文研究了键合对于有源区和 DBR 的性质影响, 从而确定通过键合方法制备长波长 VCSEL 的可行性.

2 实验与结果

键合结构分别采用 MOCVD 生长的 InGaAsP/InP 有源区和 MBE 生长的 GaAs/AlAs DBR 结构, 键合界面为 InP/GaAs. 将需要键合的外延片用三氯乙烯、丙酮、乙醇清洗后, 再用 HF:H₂O(1:10) 去除表面氧化物, 最后干燥、贴合. 键合在 500 $^{\circ}\text{C}$ 的高真空环境下进行, 工作室真空度为 10⁻⁴~10⁻⁵ Pa, 键合时间为 1h. 通过这种直接键合方式, 可以实现面积为 1cm² 的有源区与 GaAs/AlAs DBR 的单、双面键合, 拉力测试表明晶片键合强度均超过 1 $\times 10^6$ Pa, 接近体材料的强度, 键合结构可以经受解理、减薄、抛光和化学腐蚀等工艺过程. 双面键合 SEM 图像如图 1 所示.

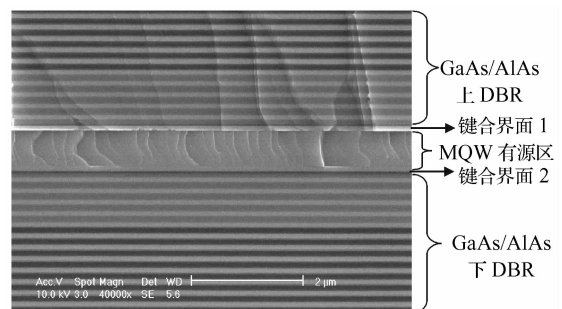


图 1 有源区与反射镜双面键合的 SEM 图像
Fig.1 SEM picture of double bonded structure

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号:2003CB314902)

[†] 通信作者. Email: grhe@semi.ac.cn

2006-08-25 收到, 2006-09-29 定稿

2.1 键合界面对电学性质的影响

将衬底 GaAs 和 InP 键合后,将键合结构减薄至 $300\mu\text{m}$ 厚度,然后蒸镀电极,再进行带胶剥离,然后合金,带胶剥离后的图案为半径 $300\mu\text{m}$ 的圆.测试得到的 $I-V$ 特性如图 2 所示,图 2(a)为 p-GaAs/p-InP 键合 $I-V$ 曲线,图 2(b)为 n-GaAs/n-InP 键合 $I-V$ 曲线.采用如文献[5]方法可计算得到 n-n 键合结构的初始表面势为 0.32eV ,与 ΔE_c 0.31eV 十分接近,其 $I-V$ 性能好于文献[5,6]的报导.p-p 键合结构拐点电压稍高(大于 0.5V),可能由于高温下的 Zn 扩散引起. $I-V$ 曲线说明,键合界面对电学性质影响较小,键合结构有较好的电学性质.

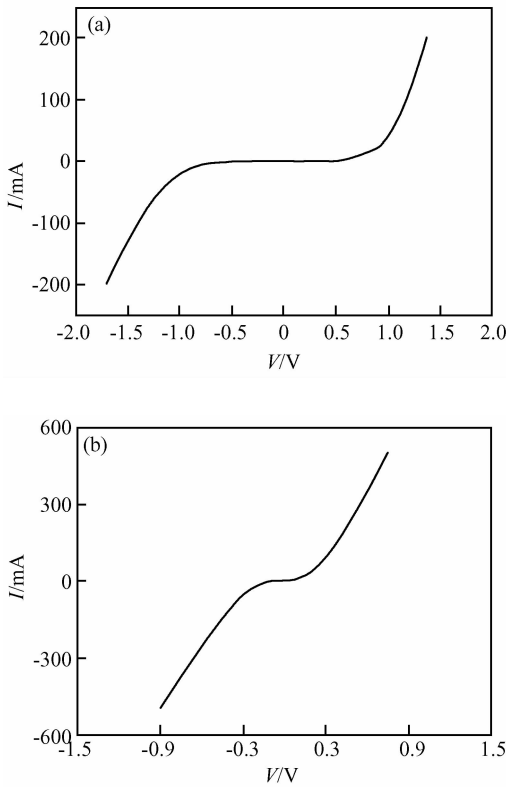


图 2 (a) p-GaAs/p-InP 键合 $I-V$ 曲线;(b) n-GaAs/n-InP 键合 $I-V$ 曲线
Fig.2 (a) $I-V$ curve for p-GaAs/p-InP bonding;(b) $I-V$ curve for n-GaAs/n-InP bonding

2.2 键合界面对光学性质的影响

GaAs/AlAs DBR 与 InP 衬底键合后的反射谱如图 3 所示.将其与计算结果和键合前的反射谱比较可知,键合后的反射谱与键合前的反射谱和计算结果基本一致,只是比键合前反射谱略微有所偏移,这可能是测试引入的误差,也可能是由于高温键合过程使得成分相互扩散而导致反射谱偏移.但由于

偏移较小(约 4nm),总的来说,键合过程对反射谱的影响基本可忽略不计.

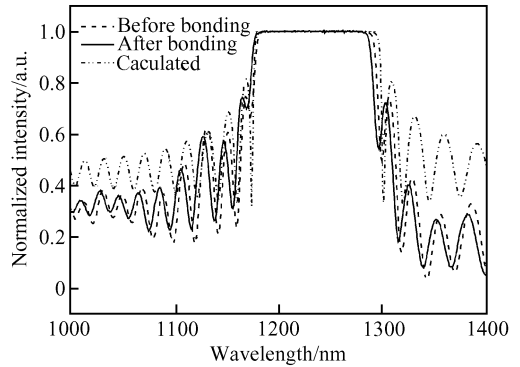


图 3 键合前后反射谱与计算的反射谱比较
Fig.3 Calculated reflectivity spectrum and experimental reflectivity results before and after bonding

将 GaAs/AlAs DBR 与 InGaAsP 有源区键合后,用 $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}(3:1)$ 将有源区的 InP 衬底和 InGaAs 腐蚀停止层去除,然后电子束溅射 3.5 对 Si/SiO₂ 介质膜,对整个结构做透射谱测试可得到腔膜.测试结果如图 4(a)所示,腔膜位于 1288nm .取

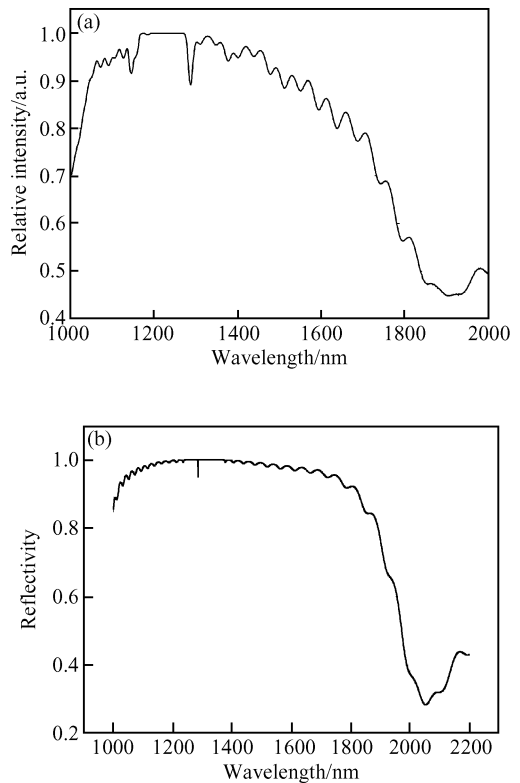


图 4 (a) 单面键合结构的腔膜测试;(b) 理论计算的反射谱结果
Fig.4 (a) Cavity mode of single bonded structure;(b) Calculated reflectivity spectrum

实际光学腔厚度与理想反射波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的 DBR 进行反射谱计算, 可得到图 4(b) 所示结果. 比较测试结果与计算结果可知, 测量曲线与计算结果趋势相近, 细节不同, 主要区别体现在: (1) 腔模位置的不同. 测量曲线的腔模位置在 1288nm , 而计算曲线在 1284nm , 腔模位置的区别源于 DBR 的实际厚度与理想厚度的偏差导致. (2) 反射带的不一致. 计算结果的反射包络十分明显, 反射率在小于 1024nm 和大于 1810nm 处开始有明显下降, 在大于 2052nm 处又开始上升. 而实际测量结果包络并不明显, 反射率在小于 1060nm 时突然下降, 在大于 1455nm 时逐步下降, 一直到 1903nm 处开始上升. 测量的反射大包络和计算的包络在带宽、形状上的差别主要源于 Si/SiO₂ DBR 溅射生长的厚度偏差, 因为 Si/SiO₂ DBR 决定反射谱的主体形状和带宽. 而腔模附近反射率的差别主要由 GaAs/AlAs DBR 生长不够理想引起, GaAs/AlAs 的生长厚度偏差导致反射带偏移, 使得腔模位于反射带边附近, 因而使得实际测量结果与理论计算结果在腔模附近的差异较大. 由测量曲线和计算曲线的比较可知, 材料生长的不够理想导致键合结构腔模测试结果的不理想, 需要进一步改善材料的生长质量.

图 5 为键合前与键合后的 PL 谱比较, 键合材料为 GaAs 衬底与 InP/InGaAsP 有源区, 键合界面为 GaAs/InP. 由图可知, 键合后的 PL 谱与原始 PL 谱半峰宽接近, 说明界面基本无缺陷, 并未使键合后的 PL 谱变差. 但谱峰有略微红移, 由 1281nm 红移到 1290nm , 红移幅度小于 10nm . 经历与键合同样退火条件之后的样品的 PL 谱与原始 PL 谱比较如图 6 所示. 退火使得样品 PL 谱发生蓝移, 峰值从 1265.5nm 移动到 1262nm , 移动幅度约为 3.5nm , 该结果与文献[7]报导是基本一致的. 键合后 PL 谱峰的红移是由于 InP, GaAs 键合过程中不同的热膨胀系数带来的应力引起综合热退火对 PL 谱峰的影响.

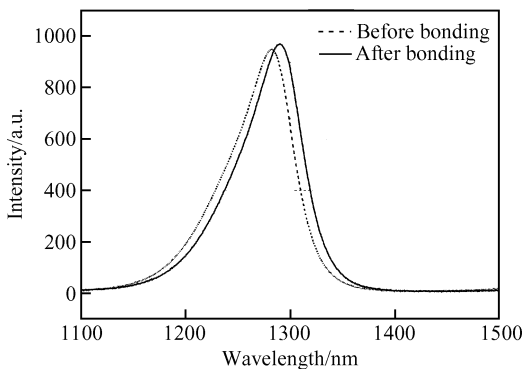


图 5 InGaAsP/InP MQW 键合前后的 PL 谱

Fig.5 PL spectra of InGaAsP/InP MQW before and after bonding

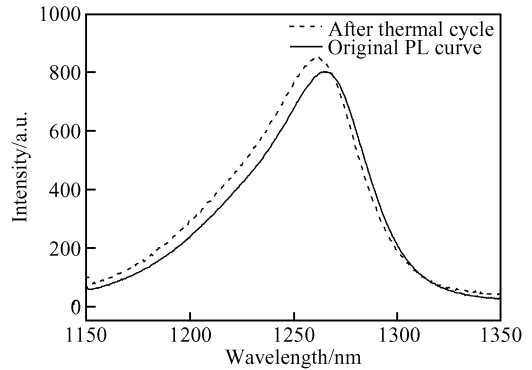


图 6 经历与键合同样热处理后的 PL 谱与原始 PL 谱比较

Fig.6 Comparison of PL spectra of sample before and after thermal cycle

响, 因键合导致的红移幅度仅为 12.5nm , 较小的红移说明键合界面引入的应力较小. 键合后峰值强度有一定的增大, 这是由键合退火过程引起的. 键合后的 PL 谱证实了键合界面的良好性质, 基本无缺陷和引入应力较小的界面使得键合对结构光学性质影响较小.

3 结论

本文通过疏水键合的方法实现了 InGaAsP/InP 有源区与 GaAs/AlAs DBR 的单面与双面键合, 并通过 SEM、*I-V* 特性、反射谱和腔模及 PL 谱测试研究了键合界面的机械性质、电学性质和光学性质. 良好的界面特性使得键合的引入对电、光特性影响较小, 从而为通过键合手段实现长波长 VCSEL 的制备打下了良好的基础.

参考文献

- [1] Karim A, Djorlin S, Piprek J, et al. Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1244
- [2] Qian Y, Zhu Z H, Lo Y H, et al. $1.3\text{-}\mu\text{m}$ vertical-cavity surface-emitting lasers with double-bonded GaAs-AlAs Bragg mirrors. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, 9(1): 8
- [3] Karim A, Black K A, Lofgreen D, et al. Superlattice barrier 1528-nm vertical-cavity laser with 85C continuous-wave operation. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000, 12(11): 1438
- [4] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W. High-power 1320nm wafer-bonded VCSELs with tunnel junctions. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(11): 1495
- [5] Wada H, Ogawa Y, Kamijoh T. Electrical characteristics of directly-bonded GaAs and InP. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(7): 738
- [6] Horng R H, Peng W C, Wu D S, et al. Surface treatment and electrical properties of directly wafer-bonded InP epilayer on GaAs substrate. *Solid-State Electron*, 2002, 46: 1103
- [7] Lam L M, Kwong C W, Ho H P, et al. Plasma immersion Ar⁺ ion implantation induced disorder in strained InGaAsP multiple quantum wells. *Electron Lett*, 1998, 34(8): 817

Analysis of the Fabrication of a Surface Emitting Laser by the Bonding Method*

He Guorong[†], Zheng Wanhua, Qu Hongwei, Yang Guohua, Wang Qing,
Wu Xuming, Cao Yulian, and Chen Lianghui

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: InGaAsP/InP active regions were single-fused or double-fused to GaAs/AlAs DBRs by hydrophobic bonding. The mechanical, optical, and electrical characteristics of the bonded interfaces were investigated through SEM, reflection spectrum, PL spectrum, and I - V curves. Good performance indicates an excellent interface. This makes it possible for the fabrication of long-wavelength surface emitting lasers by the bonding technique.

Key words: bonding; surface emitting laser; photoluminescence spectrum

EEACC: 2520D; 4320J

Article ID: 0253-4177(2007)03-0444-04

* Project supported the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2003CB314902)

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

Received 25 August 2006, revised manuscript received 29 September 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics