

980 nm 半导体激光器长期老化结果及失效分析

刘斌¹ 刘媛媛² 崔碧峰³

¹ 证据科学教育部重点实验室(中国政法大学), 北京 100088
² 中国科学院半导体研究所, 北京 100083
³ 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100024

摘要 为了提高 980 nm 半导体激光器的可靠性,采用氦离子注入形成腔面电流非注入区技术制作了 4 μm 条宽的脊形波导激光器,并利用同一块外延片制作了常规工艺的 4 μm 脊形波导激光器作为对比。经过长期老化实验得知:常规工艺器件在 1500 h 前全部失效,而采取新技术的器件寿命超过了 3000 h。通过对器件的扫描电镜分析发现,腔面灾变性损伤、钢焊料的质量和腔面污染等因素对器件失效有直接影响。

关键词 半导体激光器;氦离子注入;长期老化;失效分析;扫描电镜

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.091404

Long-Term Aging and Failure Analysis for 980 nm Laser Diodes

Liu Bin¹ Liu Yuanyuan² Cui Bifeng³

¹ Key Laboratory of Evidence Science, Ministry of Education, China University of Political Science and Law, Beijing 100088, China
² Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China
³ School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China

Abstract To improve the reliability of 980 nm laser diodes, we produce 4 μm ridge waveguide laser diodes with current non-injection regions near both facets by He ion implantation technology, and a conventional device is made from the same wafer for comparison. After long-term aging, all conventional devices are disabled within 1500 h, and all the devices made by He implantation work well after 3000 h. Failure analysis for devices by scanning electron microscopy (SEM), results shows that catastrophic optical damage on the facet, the quality of indium solder bonding and the stain of facets have direct impact on the devices' reliability.

Key words laser diodes; He ion implantation; long-term aging; failure analysis; scanning electron microscopy

OCIS codes 140.5960; 140.3460

1 引言

980 nm 半导体激光器作为掺铒光纤放大器(EDFA)的抽运源具有重要的应用价值,大功率、高可靠性是其发展的必然方向。为了提高 980nm 半导体激光器的可靠性,各国的研究人员一直在进行着不懈的努力^[1~5]。根据以前的研究结果^[6~8],知道腔面钝化是提高半导体激光器可靠性的一个重要的方法,是抑制腔面退化和灾变性光学损伤(COD)发生的直接手段。其中的腔面电流非注入区技术简单实用,可以和其他技术联合使用^[9]。本文重点研究了氦离子注入形成腔面电流非注入区技术,并制作了 4 μm 条宽的脊形波导激光器,通过长期老化实验获得了可靠性数据,并对失效器件做了扫描电镜(SEM)分析,得到了有用的结论。

收稿日期: 2012-03-05; **收到修改稿日期**: 2012-05-17; **网络出版日期**: 2012-07-12

基金项目: 中国政法大学青年教师学术创新团队资助项目和证据科学教育部重点实验室(中国政法大学)开放基金(2011KFKT04)资助课题。

作者简介: 刘斌(1970—),男,博士,讲师,主要从事半导体激光器、发光二极管及法庭科学技术等方面的研究。

E-mail: rays_liu@126.com

2 氦离子注入形成腔面电流非注入区技术

对于 GaAs 材料而言,进行质子、氧或者氦离子注入都可以获得高电阻率。离子注入获得高电阻率的原理在于:离子注入使晶体中形成缺陷,而这些缺陷是载流子的俘获中心,因而获得高电阻率。人们对氦离子注入进行了深入的研究^[10,11]。经过实验研究,本文最终放弃了质子注入的方法^[12],主要研究了氦离子注入形成腔面电流非注入区技术,主要原因在于质子注入形成高电阻区的长期稳定性有待改进。在半导体激光器腔面附近进行氦离子注入,使材料获得高电阻率,经过适当条件的热退火处理后,消除离子注入过程中产生的大部分缺陷,同时保留足够高的电阻率,由此形成腔面电流的非注入区。

腔面电流非注入区的原理是:在半导体激光器的两个腔面附近分别引进约 25 μm 长的电流非注入区,以限制电流注入到腔面。通过减少腔面附近载流子的注入,减少腔面处非辐射复合的发生,由此使腔面温升减小,COD 阈值功率提高。而 COD 阈值功率的提高对提高 980 nm 半导体激光器的可靠性有显著意义:激光器的 COD 阈值功率不是固定不变的,随着激光器工作时间的推移,COD 阈值功率会逐渐下降,当 COD 阈值功率下降到等于激光器的工作功率时,激光器就会失效。因此,提高激光器的 COD 阈值功率将有利于提高激光器的可靠性。腔面电流非注入区技术简单实用,可以和其他方法共同使用。

以前报道过应用 SiO_2 形成腔面附近的电流非注入区的方法^[9]。同应用 SiO_2 膜层形成腔面电流非注入区的工艺比较,应用离子注入形成腔面非注入区技术有以下优点:1)从散热角度考虑,特别是管芯 P 面朝下焊接在热沉上时, SiO_2 膜层不利于散热,会导致腔面温度升高,而应用离子注入形成腔面电流非注入区技术可以获得良好的散热。2)从限制电流的侧向扩散角度考虑,应用 SiO_2 膜层可以限制电流由非注入区直接注入到腔面,但是电流可以侧向扩散到腔面处,这会影响到非注入区的效果。而应用离子注入形成腔面电流非注入区时,离子注入的平均深度达到表面以下 200 nm 处,这个深度范围对电流的侧向扩散有良好的限制作用。因此,应用离子注入形成腔面非注入区会获得更好的效果。

离子注入过程会带来附加的晶格缺陷,如高位错密度和附加的应力等。应用适当的热退火条件,可以消除这些不利因素的影响,同时保持相当高的电阻率。热退火条件由离子注入的能量、剂量及注入离子的质量等因素决定。经过适当的热退火后,氦离子注入区不但消除了不利的影响,而且其电阻率还有所提高。但也要防止过高的热退火温度使缺陷完全消失,以至于电阻率又恢复到未进行离子注入前的水平。本文所采用的氦离子注入条件为:能量 600 keV,剂量 $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$,离子注入时样品的温度为室温。

3 器件长期老化实验及结果

器件的老化测试对可靠性的研究具有重要的意义。通过高温加速老化可以外推出器件的实际寿命。通过对长期老化数据的分析可以判断器件的失效模式,对失效器件进行检测分析可以获得器件失效的原因,进而提出改进方案。

根据现有的实验条件,做了室温恒电流长期老化测试。改进的器件应用了氦离子注入形成腔面电流非注入区技术。

样品制备情况如下:从同一外延片上取下两个 1/4 片,制作常规工艺管芯和带有腔面电流非注入区的管芯,外延片的生长工艺见参考文献^[13]。由于氦离子注入形成腔面电流非注入区工艺在常规半导体激光器制造工艺之前完成,因此两种管芯的常规制作过程和工艺是同时进行的。以此来检验腔面非注入区技术的效果及可行性。管芯腔长为 900 μm ,前后腔面分别镀 5% 的增透膜和 95% 的高反膜。

制备了常规工艺制作的 4 μm 条宽脊形波导激光器和带有腔面电流非注入区的 4 μm 条宽脊形波导激光器各 10 只。管芯 P 面朝下用钢焊料烧结到铜热沉上,TO3 形式封装,但未进行气密性封装。老化条件为室温 25 $^{\circ}\text{C}$,工作电流为 300 mA。测试条件为室温 25 $^{\circ}\text{C}$,输出功率 200 mW。

常规器件老化结果显示:4 只管芯为缓慢退化,最大工作时间为 528 h;6 只管芯为突然失效,其中 3 只的工作时间为 528 h,另外 3 只的工作时间为 1400 h。

表 1 为带有腔面电流非注入区的器件的老化数据。

表 1 带有腔面电流非注入区的器件老化测试结果
Table 1 Long-term aging data of laser diodes with current non-injection regions near both facets
by He ion implantation technology

Chip	Threshold current			Working current			
	0 h /mA	3000 h /mA	Changing rate /%	0 h /mA	3000 h /mA	Changing rate /%	Average changing rate /%
1	30	30	0	380	400	5	12
2	20	20	0	290	310	7	
3	20	20	0	300	320	7	
4	20	20	0	280	320	14	
5	20	30	50	290	340	17	
6	20	20	0	280	320	14	
7	30	30	0	280	320	14	
8	20	30	50	280	320	14	
9	30	30	0	290	330	14	
10	20	30	50	290	330	14	

表 1 中的数据是工作时间为 3000 h 后所测试的实验结果,也就是说所有的带有腔面电流非注入区的管芯工作时间都已经超过 3000 h,而且工作状态正常。

4 器件的失效分析

为了确定常规工艺制作的管芯的失效原因,对 10 只失效管芯做了 SEM 测试。分析显示,导致管芯失效的原因主要有:腔面灾变性损伤、腔面污染、焊料层出现空隙等缺陷。

1) 腔面灾变性损伤。图 1 为管芯发生腔面损伤的 SEM 图片。从图中可以清楚地看到脊形波导处的出光腔面发生严重损伤,而且焊料烧结层出现清晰的空隙。这两个缺陷足以导致管芯失效。

2) 腔面污染。图 2 显示了腔面污染的状态。腔面被杂质污染后会增加对输出光的吸收,使腔面温度上升,最终会导致腔面 COD 的发生。

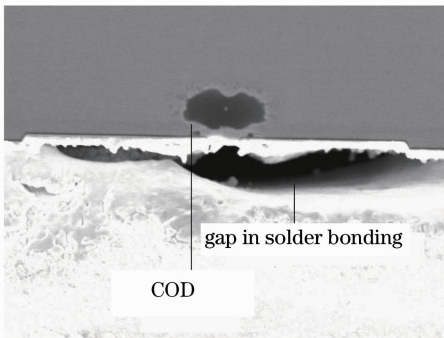


图 1 腔面灾变性损伤和焊料层空隙

Fig. 1 COD on facet and gap in indium solder bonding

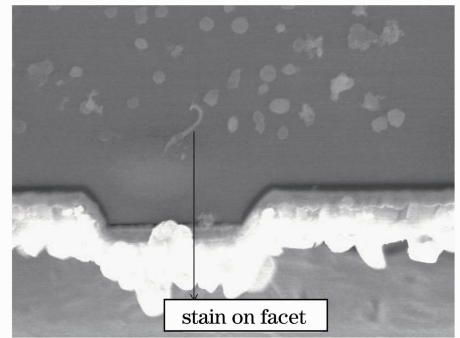


图 2 腔面污染

Fig. 2 Stain on facet

3) 焊料层出现空隙等缺陷。从图 3 所示 SEM 图片可以清楚地看到焊料层出现了空隙。空隙的出现会影响激光器的正常散热,使激光器工作温度上升,影响了激光器的使用寿命,并最终导致管芯失效。

另外,图 4 显示了焊料出现外溢,同时图片右侧显示焊料层出现空隙。

在 SEM 分析的 10 只常规工艺管芯中,有 6 只管芯出现明显的腔面损伤;2 只出现腔面污染;10 只管芯全部出现明显的焊料层缺陷,包括焊料外溢和焊料层空隙。这说明对于要求大输出功率和长期可靠性的工作环境,腔面的 COD 是必须解决的一个问题,镀膜后腔面的污染问题也不容忽视,而采用钢焊料管芯烧结工艺不适合于长期可靠性的要求。

从带有腔面电流非注入区的管芯中随机选出两只做了 SEM 测试。测试结果显示,这两只管芯也有焊料层空隙等缺陷,但腔面都没有退化现象。这说明了在制造工艺中存在的这些缺陷对器件的影响是不同的。常规器件的快速退化说明了腔面退化和腔面 COD 的影响是主要的。带有腔面电流非注入区的管芯具有较

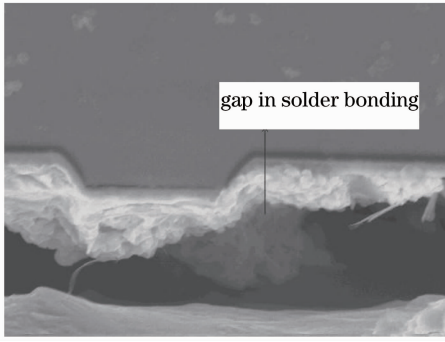


图3 焊料层空隙

Fig. 3 Gap in the indium solder bonding

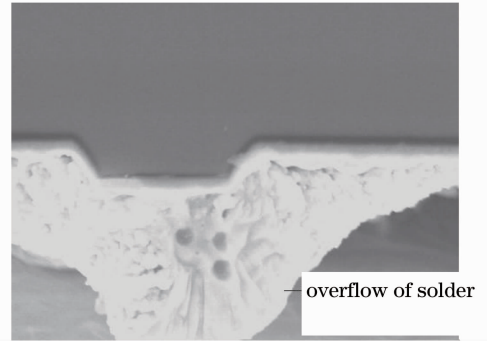


图4 焊料外溢

Fig. 4 Overflow of indium solder

好的可靠性说明该技术在抑制腔面退化上起到了很大的作用,以至于在有其他缺陷存在的情况下仍然保持了良好的可靠性。但从长期可靠性考虑,焊料层空隙及腔面污染等缺陷也要消除,这样才可以获得良好的可靠性。

5 结 论

通过对失效管芯和带有腔面电流非注入区管芯的 SEM 分析,得到如下结论:对于要求大输出功率和长期可靠性的工作环境,腔面的 COD 是必须解决的一个问题,镀膜后腔面的污染问题也不容忽视,采用钢焊料管芯烧结工艺不适合于长期可靠性的要求。

在制作工艺中存在的各种缺陷对器件的影响是不同的。常规器件的快速退化说明了腔面退化和腔面 COD 的影响是主要的。带有腔面电流非注入区的管芯具有较好的可靠性说明该技术在抑制腔面退化上起到了很好的作用。但考虑长期可靠性,焊料层空隙及腔面污染等缺陷也要消除。

参 考 文 献

- 1 B. Pedersen, B. A. Thompson, S. Zemon *et al.*. Power requirements for erbium-doped fiber amplifiers pumped in 800, 980, and 1480 nm bands [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(1): 46~49
- 2 M. Fukuda, M. Okayasu, J. Temmyo *et al.*. Degradation behavior of 0.98- μm strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(2): 471~476
- 3 A. Moser, A. Oosenbrug, E. E. Latta *et al.*. High-power operation of strained InGaAs/AlGaAs single quantum well lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(21): 2642~2644
- 4 M. Okayasu, M. Fukuda, T. Takeshita *et al.*. Facet oxidation of InGaAs/GaAs strained quantum-well lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(12): 8346~8351
- 5 Chong Feng, Wang Jun, Xiong Cong *et al.*. An asymmetric broad waveguide structure for a 0.98- μm high-conversion-efficiency diode laser [J]. *J. Semiconductors*, 2009, **30**(6): 64~67
- 6 A. V. Syrбу, V. P. Yakovlev, G. I. Suruceanu *et al.*. ZnSe-facet-passivated InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers of high CW power and “wallplug” efficiency [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4): 352~353
- 7 J. E. Ungau, N. S. K. Kwong, S. W. Oh *et al.*. High power 980 nm nonabsorbing facet lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(21): 1766~1767
- 8 M. Sagawa, K. Hiramoto, T. Toyonaka *et al.*. High power COD-free operation of 0.98 μm InGaAs/GaAs/InGaP lasers with non-injection regions near the facets [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(17): 1410~1411
- 9 Fang Gaozhan, Xiao Jianwei, Ma Xiaoyu *et al.*. High power GaAs/AlGaAs ($\lambda = 808$ nm) laser diode arrays with non-injection regions near the facets [J]. *High Technology Letters*, 2000, **10**(12): 9~11
方高瞻, 肖建伟, 马晓宇等. 带有腔面非注入区的大功率 808 nm GaAs/AlGaAs 激光二极管阵列 [J]. 高技术通讯, 2000, **10**(12): 9~11
- 10 U. Zeimer, E. Nebauer. High-resolution X-ray diffraction investigations of He-implanted GaAs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2000, **15**(10): 965~970

- 11 S. Ahmed, R. Gwilliam, B. J. Sealy. Ion-beam-induced isolation of GaAs layers by $^4\text{He}^+$ implantation; effects of hot implants [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2001, **16**(10): L64~L67
- 12 Liu Bin, Zhang Jingming, Ma Xiaoyu *et al.*. The investigation of 980 nm ridge waveguide lasers with current non-injection regions by proton implantation [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(2): 109~111
刘 斌, 张敬明, 马晓宇 等. 980 nm 脊型波导激光器腔面非注入区的研究 [J]. *激光与红外*, 2003, **33**(2): 109~111
- 13 Liu Bin, Zhang Jingming, Ma Xiaoyu *et al.*. Investigation of 980 nm ridge waveguide lasers with current non-injection regions by He ion implantation [J]. *J. Semiconductors*, 2003, **24**(3): 234~237