

915 nm 半导体激光器新型腔面钝化工艺

王鑫^{1,2}, 朱凌妮¹, 赵懿昊¹, 孔金霞¹, 王翠鸾¹, 熊聪¹, 马骁宇¹, 刘素平¹

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对半导体激光器腔面光学灾变损伤的发生机制, 设计了一种单管芯半导体激光器腔面真空解理钝化工艺方法。在真空中解理并且直接对半导体激光器腔面蒸镀钝化膜, 提出用 ZnSe 材料作为单管芯半导体激光器真空解理工艺的钝化膜材料, 发现利用真空解理钝化工艺方法和 ZnSe 材料作为钝化膜可以使器件输出功率提高 23%。通过电致发光(EL)对半导体激光器腔面损伤机理进行分析。进一步说明对 915 nm 半导体激光器制备工艺中引入真空解理钝化工艺技术并且选择 ZnSe 作为钝化膜可以有效保护半导体激光器腔面, 提高器件可靠性。

关键词: 半导体激光器; 腔面钝化; 真空解理钝化; 失效分析

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0105002

915 nm semiconductor laser new type facet passivation technology

Wang Xin^{1,2}, Zhu Lingni¹, Zhao Yihao¹, Kong Jinxia¹, Wang Cuiluan¹, Xiong Cong¹,
Ma Xiaoyu¹, Liu Suping¹

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the mechanism of catastrophic optical damage of semiconductor laser cavity surface, a single-chip semiconductor laser cavity surface vacuum cleavage passivation process was designed. The cleavage process in vacuum and direct evaporation of passivation film on the surface of semiconductor laser cavity was proposed. Using ZnSe material as the passivation film material for the vacuum cleavage process of single-die semiconductor laser, it was found that the vacuum cleavage passivation process and ZnSe material could be used as the passivation film to increase the output power of the device by 23%. The mechanism of semiconductor laser cavity surface damage was analyzed by electroluminescence (EL). It is further explained that the introduction of vacuum cleavage passivation technology in the preparation process of 915 nm semiconductor laser and the selection of ZnSe as the passivation film can effectively protect the cavity surface of the semiconductor laser and improve device reliability.

Key words: semiconductor laser; facet passivation; cleaving in high vacuum; failure analysis

收稿日期: 2018-08-11; 修订日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61306057)

作者简介: 王鑫(1988-), 男, 博士生, 主要从事高损伤阈值半导体激光器件方面的研究。Email: wangxinhehe123@semi.ac.cn

通讯作者: 赵懿昊(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事大功率半导体激光器件方面的研究。Email: lingxiao431@semi.ac.cn

导师简介: 马骁宇(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 硕士, 主要从事大功率半导体激光器件及技术方面的研究。Email: maxy@semi.ac.cn

0 引言

大功率半导体激光器具有体积小、重量轻、高输出功率、高电光转化效率、可靠性好等优点,被广泛应用于光通信、光信息储存、泵浦光纤激光器、激光工业以及激光医疗等领域。国内外,半导体激光器是高效单色光源的光电子系统中的核心元器件^[1-4],在光纤耦合输出中也有着重要应用^[5-8]。随着其应用的不断扩大,对于半导体激光器的可靠性提出了更高的要求。而器件的腔面光学灾变是影响其可靠性的一个关键因素,如何防止器件腔面光学灾变的产生,成为目前提高 915 nm 半导体激光器可靠性主要的研究方向^[9]。

常用的半导体激光器工作在大气的环境下,这使得器件的腔面极易受到空气中的水分和氧原子污染,导致潮解和氧化,半导体激光器腔面的自然氧化物和沾污在有电流注入时将成为非辐射复合中心,当注入电流增大时,非辐射的加剧造成结温的急剧上升,最终导致光学灾变损伤(Catastrophic Optical Damage, COD),使得器件失效。因此对半导体激光器的腔面进行钝化处理十分重要。

近年来已有很多采用硫钝化、离子钝化、氧钝化、非注入窗口等技术实现半导体激光器的高功率输出。如北京工业大学何新等人利用离子铈氮钝化处理半导体激光器腔面得到了 22.5 W 的 COD 阈值,中国科学院半导体研究所刘媛媛等人利用非注入窗口方法实现 980 nm 半导体激光器在室温下输出 200 mW^[10-11]。美国 Christofer 等人利用氮离子清洗腔面的方法对同波长激光器腔面进行钝化都有效地提高了器件的可靠性。B.Brennan 等人利用优化后的硫钝化工艺在室温下钝化 InGaAs 基激光器,同时利用 XPS 等检测方式得到,当钝化时间为 20 min 时,可以有效去除表面污染^[12-13]。而这些方法的稳定性和可靠性并不是很好,并且在去除表面态、减少缺陷方面并不是十分完美。

研究提出在超高真空中对半导体激光器进行解理,并在真空中直接蒸镀一层厚度 25 nm 左右的 ZnSe 材料作为钝化膜的方法,利用 ZnSe 薄膜材料大禁带宽度的特性作为半导体激光器腔面钝化膜,并测试器件腔面损伤阈值,通过电致发光(electroluminescent, EL)

分析器件损伤后腔面变化。结果表明,利用带有 ZnSe 钝化膜的真空解理钝化镀膜技术可以有效提高半导体激光器输出功率,提高器件损伤阈值,有效保护腔面。

1 外延片结构

实验中以 915 nm 半导体激光器为例,外延层结构通过金属有机化学气相沉积(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD),以 InGaAs/AlGaAs 在 n-GaAs 衬底上生长,生长温度为 600 °C,采用渐变折射率波导结构,各层厚度、成分及生长顺序是:1 300 nm 的下限制层 N-AlGaAs,500 nm AlGaAs 过渡层,700 nm 的下波导层 N-AlGaAs,8 nm 的垒层 Al_{0.25}Ga_{0.75}As,9 nm 的量子阱 AlGaInAs,10 nm 的垒层 Al_{0.25}Ga_{0.75}As,700 nm 的上波导层 AlGaAs,1 100 nm 的上限制层 P-AlGaAs,200 nm P-GaAs 盖层。外延层详细结构如图 1 所示。

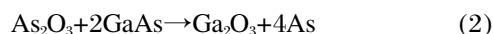
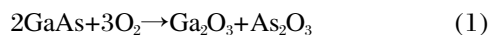
200 nm P-GaAs cladding layer
1 100 nm P-AlGaAs upper confinement layer
700 nm P-AlGaAs upper waveguide layer
10 nm Al _{0.25} Ga _{0.75} As barrier layer
9 nm AlGaAs quantumwell layer
8 nm Al _{0.25} Ga _{0.75} As barrier layer
700 nm N-AlGaAs lower waveguide layer
500 nm AlGaAs transition layer
1 300 nm N-AlGaAs lower confinement layer
N-GaAs substrate

图 1 915 nm 半导体激光器外延层结构

Fig.1 915 nm semiconductor laser epitaxial layer structure

2 实验原理

半导体激光器晶片在空气中解理时,新解理出来的腔面很容易与空气中的氧原子或是其他杂质发生反应,进而产生氧化或是其他污染,如当 III-V 族材料 GaAs 半导体材料暴露在空气中时,GaAs 材料自身和其形成的氧化物与空气中的氧原子会发生如下反应:



造成大量表面态的形成, 进而导致半导体激光器腔面非辐射复合中心的形成, 影响半导体激光器器件特性。

利用真空解理钝化镀膜系统, 在高真空 (真空度 $\sim 6 \times 10^{-10}$ torr, 1 torr = 133.32 Pa) 中, 将半导体激光器晶片解理成 bar 条, 然后直接在真空中 (真空度 $\sim 3 \times 10^{-10}$ torr) 对 bar 条腔面蒸镀钝化膜, 选择钝化薄膜材料时, 应确保其必须对能与半导体激光器芯片材料发生反应的杂质粒子起到势垒的作用, 这样能够防止杂质粒子扩散到激光器腔面, 从而避免发生反应并形成缺陷。

实验中选取 ZnSe 为钝化膜材料, ZnSe 材料为宽禁带材料, 禁带宽度为 2.75 eV, 而 GaAs 禁带宽度为 1.42 eV^[4]。根据文中之前研究, 采用钝化膜材料为 Si, 禁带宽度为 1.12 eV。可知禁带宽度 $ZnSe > GaAs > Si$, 选取 ZnSe 作为钝化膜材料可以在腔面形成高势垒, 阻止腔面载流子发生复合, 降低腔面吸收, 提高腔面损伤阈值, 同时由于在真空中进行解理钝化镀膜工艺, 可以有效地防止腔面受到空气中水、氧原子和碳原子等的污染, 进一步提高半导体激光器的损伤阈值和可靠性^[14-17]。图 2 为进行过真空解理 ZnSe 材料钝化后半导体腔面图。

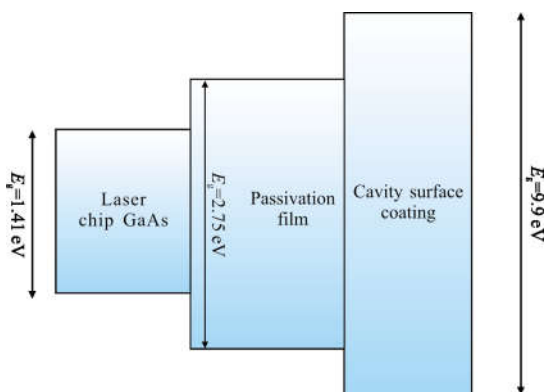


图 2 半导体激光器腔面 ZnSe 钝化原理图

Fig.2 Schematic of ZnSe passivation the facet of the semiconductor laser

3 实验步骤

将制备好的 915 nm 半导体激光器晶片减薄抛光, 最终厚度为 120 μm , 在空气中将减薄抛光过的晶片解理成矩形。分别将解理成矩形的晶片再进行解理, 样品 A 在空气中进行解理, 样品 B 和样品 C

分别在高真空中解理并且钝化, 钝化膜材料分别为 Si 和 ZnSe, 钝化膜厚度为 25 nm。样品 A、B、C 前后腔面蒸镀光学膜相同, 前腔面反射率为 4%, 后腔面反射率为 95%。如表 1 所示。

表 1 实验样品表

Tab.1 Samples of the experiments

Sample No.	Cleavage environment	Passivation film material	Passivation film thickness
A	Air	-	-
B	High vacuum	Si	25 nm
C	High vacuum	ZnSe	25 nm

4 实验结果及分析

图 3 列出了半导体激光器 A、B、C 样品的输出功率与工作电流变化曲线, 从器件功率测试曲线可以看出, 其失效顺序分别为: 真空中解理钝化膜为 Si 材料-样品 B, 输出功率为 8 W 时发生 COD, 空气中解理不蒸镀钝化膜-样品 A, 输出功率为 12 W 时发生 COD, 真空解理蒸镀 ZnSe 钝化膜的半导体激光器-样品 C, 输出功率为 14.8 W 时发生 COD。由此可以看出, 对半导体激光器进行真空解理钝化工艺并采用 ZnSe 材料钝化膜结合方法可以有效提高半导体激光器输出功率和 COD 损伤阈值。从图 3 可以看出利用真空解理并且蒸镀 ZnSe 钝化膜的半导体激光器输出功率, 相比于空气中解理的器件输出功率提高 23%。可以说明利用真空解理钝化工艺可以有效减少在芯片解理过程中空气中氧原子、水蒸气和碳原子对半导体激光器腔面的污染, 减少腔面表面态, 提高半导体激光器腔面损伤阈值。同时利用禁带宽度较大的 ZnSe 材料可以在腔面形成势垒, 阻止腔面载流子发生复合, 降低腔面吸收, 进一步提高腔面损伤阈值。分析在真空解理钝化工艺过程中, 使用 Si 钝化膜的器件性能较差, 是因为当钝化膜材料 Si 的厚度超过 10 nm 时, 可能产生价带量子态, 导致载流子扩散到 Si 钝化膜层, 而较厚的 Si 钝化膜会形成载流子通道使载流子加速流入激光器腔面, 形成非辐射复合中心, 严重影响器件输出功率和可靠性, 从而导致利用较厚 Si 材料作为钝化膜的激光器样品输出功率低于空气中解理的样品。

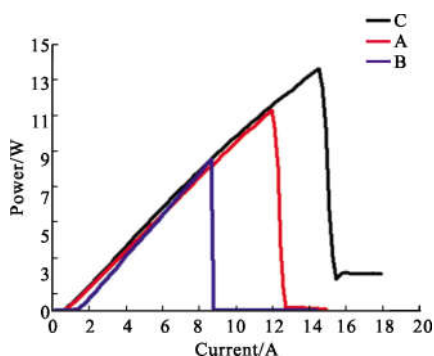


图 3 不同激光器单管的 P-I 曲线

Fig.3 P-I curves of semiconductor laser devices

5 器件失效分析

图 4 列出了通过金相显微镜和电致发光分析设备,对半导体激光器腔面损伤及器件失效原因进行 EL 分析。从图中 4 中可以看出,空气中解理不蒸镀钝

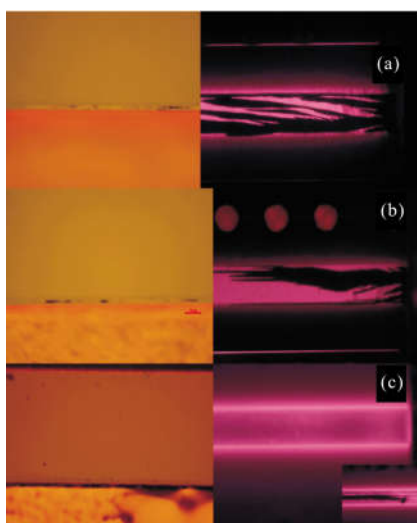


图 4 半导体激光器腔面 EL 分析图

Fig.4 EL analysis of semiconductor laser devices

化膜(a)和真空解理蒸镀 Si 钝化膜(b)的半导体激光器样品激光器腔面在发生 COD 时都会产生腔面 COD 损伤线,而在真空中解理并且利用 ZnSe 进行钝化的半导体激光器(c)在发生 COD 时腔面并没有出现 COD 损伤线,从 EL 分析来看,样品 C 的前腔面形貌保持完好,而样品中间出现黑色损伤区域,说明器件样品是在发生体 COD 的情况下失效而产生的暗线(Dark Line Defect, DLD)。样品 A 和样品 B 的前腔面基本全部发生 COD 而出现几乎贯穿整个腔面

发光区的 DLD,进一步说明真空解理钝化工艺对防止腔面在解理过程中吸附氧原子等杂质有显著效果,可以有效地防止器件腔面表面态密度及非辐射复合中心的形成,提高器件的损伤阈值和可靠性。

6 结论

以 915 nm 半导体激光器为例,研究了半导体激光器腔面使用不同钝化方法和钝化膜对器件 COD 阈值的影响。通过真空解理钝化镀膜工艺和 ZnSe 材料作为钝化膜,利用真空中解理激光器 bar 条使其避免空气中氧原子及碳原子的污染和 ZnSe 材料大禁带宽度特性可以有效形成势垒,阻止载流子的非辐射复合,提高半导体激光器腔面输出功率和器件可靠性。利用真空解理钝化并且钝化膜材料为 ZnSe 的激光器输出功率可以达到 14.8 W 比空气中解理的激光器输出功率提高 23%,有效地提高了半导体激光器腔面损伤阈值。并且通过对 Si 钝化膜材料的分析,提出使用 Si 钝化膜材料的厚度应小于 10 nm。通过对器件 COD 后腔面观测和 EL 分析,说明真空解理钝化镀膜并且选用 ZnSe 作为钝化膜可以有效保护激光器腔面,提高其可靠性。

参考文献:

- [1] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun, et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (4): 0401001. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊, 等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0401001.
- [2] Xu Zhengwen, Qu Yi, Wang Yuzhi, et al. Simulation analysis of high power asymmetric 980 nm broad-waveguide diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (4): 1094-1098. (in Chinese)
徐正文, 曲轶, 王钰智, 等. 高功率 980 nm 非对称宽波导半导体激光器设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1094-1098.
- [3] Li Zhi, Yao Shun, Gao Xiangyu, et al. Calculation for the fast axis beam quality of the laser diode stack [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 85-90. (in Chinese)
李峙, 尧舜, 高祥宇, 等. 半导体激光器堆栈快轴光束质量计算的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 85-90.
- [4] Li Zaijin, Hu Liming, Wang Ye, et al. Fabrication of 808 nm

- Al-containing semiconductor laser diode high damage threshold facet coating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1034–1037. (in Chinese)
- 李再金, 胡黎明, 王焯, 等. 808 nm 掺铝半导体激光高损伤阈值腔面膜制备[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1034–1037.
- [5] Hai Yina, Zou Yonggang, Tian Kun, et al. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 195–206. (in Chinese)
- 海一娜, 邹永刚, 田焯, 等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(2): 195–206.
- [6] Liu Youqiang, Cao Yinhua, Li Jing, et al. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1279–1287. (in Chinese)
- 刘友强, 曹银花, 李景, 等. 激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1279–1287.
- [7] Zhu Hongbo, Hao Mingming, Liu Yun, et al. 808 nm high brightness module of fiber coupled diode laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1684–1689. (in Chinese)
- 朱洪波, 郝明明, 刘云, 等. 808 nm 高亮度半导体激光器光纤耦合器件[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1684–1689.
- [8] Wu Hualing, Guo Linhui, Yu Junhong, et al. Design of 500 W-output fiber-coupled diode laser module[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1005005. (in Chinese)
- 吴华玲, 郭林辉, 余俊宏, 等. 500 W 半导体激光器光纤耦合输出模块设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1005005.
- [9] Kong Zhenzhen, Cui Bifeng, Huang Xinzhu, et al. Study on performance improvement of high power semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 071403. (in Chinese)
- 孔真真, 崔碧峰, 黄欣竹, 等. 大功率半导体激光器性能改善的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54: 071403.
- [10] He Xin, Cui Bifeng, Liu Menghan. Research on nitrogen passivation for high power semiconductor lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(7): 805–808. (in Chinese)
- 何新, 崔碧峰, 刘梦涵, 等. 大功率半导体激光器腔面氮钝化的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(7): 805–808.
- [11] Liu Bin, Liu Yuanyuan, Cui Bifeng. Long-term aging and failure analysis for 980 nm laser diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49: 091404. (in Chinese)
- 刘斌, 刘媛媛, 崔碧峰, 等. 980 nm 半导体激光器长期老化结果及失效分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49: 091404.
- [12] Christofer S, Yangting S, Peter B, et al. Nitride facet passivation raises reliability, COMD and enables high temperature operation of InGaAsP, InGaAs and InAlGaAs lasers[C]//SPIE, 2005, 5711: 189–200.
- [13] Brennan B, Milojevic M, Hinkle C L, et al. Optimisation of the ammonium sulphide $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ passivation process on $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257: 4082–4090.
- [14] Chand N, Hobson W S, De Jong J F. ZnSe for mirror passivation of high power GaAs based lasers[J]. *Electronics Letter*, 1996, 32(17): 1595–1596.
- [15] Ziegler M, Tomm W, Elsaesser T. Imaging catastrophic optical mirror damage in high-power diode lasers[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(6): 709–714.
- [16] Souto J, Pura J L, Torres A. Catastrophic optical damage of high power InGaAs/AlGaAs laser diodes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 64: 627–630.
- [17] Gong Xueqin, Feng Shiwei, Yang Hongwei. Degradation analysis of facet coating in GaAs-based high-power laser diodes [J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2015, 15(3): 359–362.