

808 nm 连续输出 13.6 W 单芯片大功率激光器

李沛旭¹, 殷方军¹, 张成山¹, 开北超¹, 孙素娟¹, 江建民¹, 夏伟^{1,3}, 徐现刚^{1,2}

¹ 山东华光光电子股份有限公司, 山东 济南 250101;

² 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;

³ 济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022

摘要 通过对大功率激光器腔面光学灾变损伤的研究, 分析了激光器腔面镀膜的损伤机理。为了提高激光器的输出功率, 采用 TiO₂ 替换 Si 作为高折射率材料, 建立非标准膜系降低电场强度, 同时优化膜层材料的粗糙度, 并采用离子源进行清洗和助镀, 有效提高了激光器的腔面光学灾变损伤阈值。结果表明, 所制作的 808 nm 激光器, 最大连续输出功率达到 13.6 W。

关键词 激光器; 光学灾变损伤; 腔面镀膜; TiO₂; 808 nm 波长

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101013

808 nm Single Emitter High Power Laser with 13.6 W

Li Peixu¹, Yin Fangjun¹, Zhang Chengshan¹, Kai Beichao¹, Sun Sujuan¹,
Jiang Jianmin¹, Xia Wei^{1,3}, Xu Xiangang^{1,2}

¹ Shandong Huaguang Optoelectronics Co. Ltd., Jinan, Shandong 250101, China;

² State Key Lab of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;

³ School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China

Abstract The catastrophic optical damage of the high power laser is studied, and the damage mechanism of the laser facet coating is analyzed. In order to increase the output power of the laser, the TiO₂ is used to replace the Si as the high refractive index materials, the nonstandard film is set up to reduce the intensity of electric field. Meanwhile, the roughness of the film materials is optimized, and the ion source is used to clean and flux. The threshold of the catastrophic optical damage is effectively improved. The results show that the proposed laser has a maximum continuous output power of 13.6 W.

Key words lasers; catastrophic optical damage; facet coating; TiO₂; wavelength of 808 nm

OCIS codes 140.2020; 140.5960; 230.5590

1 引 言

808 nm 大功率半导体激光器是激光器的主要代表之一, 广泛应用于抽运 Nd:YAG 固体激光器、工业加工和激光医疗等领域, 发展 808 nm 高效率大功率半导体激光器具有重要的现实意义^[1-3]。随着应用需求的不断扩展, 对半导体激光器抽运源的要求也越来越高, 主要体现在以下方面: 1) 提高输出功率; 2) 提高电光转换效率; 3) 提高光束质量; 4) 提高可靠性。

要想实现高的输出功率, 提高光学灾变损伤 (COD) 阈值是根本。国内外许多研究者对 COD 问题开展了许多研究, 目前主要方法有真空解理、腔面钝化、腔面镀制保护膜等。这些方法能够在一定程度上提高损伤阈值, 但工艺复杂, 所需设备昂贵, 增加生产成本^[4]。

本文主要从以下方面进行腔面镀膜的研究工作, 并提升激光器的输出功率和可靠性: 1) 对大功率激光器腔面镀膜的损伤机理进行分析, 优选镀膜材

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-09-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401802)

作者简介: 李沛旭(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事半导体激光器的材料、结构及器件的设计制作等方面的研究。E-mail: lipx@inspur.com

料和反射率;2)建立非标准膜系,优化膜层材料的粗糙度,并采用离子源助镀,有效提高了激光器的腔面损伤阈值和最大输出功率。

2 基本原理

808 nm 大功率半导体激光器的输出光功率密度非常高,工作时其光功率密度可达 $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上。出光腔面的好坏直接影响激光器的输出特性和可靠性。因此,腔面镀膜工艺是直接决定器件可靠性的关键工艺。研究表明,腔面薄膜的损坏机制主要有薄膜材料杂质吸收诱导的破坏、激光电场导致的破坏、光子吸收引起的电离、薄膜材料本身缺陷造成的破坏等^[5-7]。

激光器腔面镀膜使激光器腔面材料和空气及各种污染物隔离,阻止了大气对于腔面的污染和损伤,但激光器腔面与薄膜材料本身会在界面处发生反应,影响腔面薄膜的界面态和粗糙度,在高功率工作状态下会造成损伤,而这也与薄膜内的温度、材料的吸收系数及界面处的电场强度相关^[8]。因此,优化电场分布和提高膜层的粗糙度非常必要。

2.1 镀膜材料的选取

为了获得性质稳定、高致密性、高粘附性且高损伤阈值的光学薄膜,需要考虑镀膜材料的性质,包括纯度、机械性能、化学特性等。 Al_2O_3 是一种非常稳定的材料,它的结构和成分在频繁的工艺集成过程中也不会产生明显的变化,因此,选择 Al_2O_3 代替 SiO_2 作为低折射率材料。一般高折射率材料的吸收系数比低折射率材料高 1~2 个数量级,因此,选用 TiO_2 替代 Si 作为高折射率材料,达到降低吸收的目的。

2.2 电场强度的优化

激光在波导中的传输满足驻波条件,可用光学矩阵法计算膜系的电场强度分布。文献^[7,9]已经对激光器常规腔面高反膜进行了电场强度的优化分析和计算。采用 TiO_2 和 Al_2O_3 作为高反膜并进行了非标准膜系的优化。通过优化设计膜层厚度,特别是与腔面接触的前几层光学膜,使电场强度相对均衡地分布在每层膜上并降低最高电场强度,从而避免局部电场强度过高引起的永久性光学损伤。

2.3 膜层粗糙度的优化

改进镀膜工艺参数,降低粗糙度,提高膜层材料的质量也是提高激光器腔面膜损伤阈值的有效方法。分别针对 Al_2O_3 、 TiO_2 膜系的电子束蒸发条件进行了优化,主要从蒸发速率、转速、离子源助镀条件等方面进行了优化,最后得到了粗糙度相对较小

的膜系。同时通过离子源助镀,也有效提高了膜层的粘附性。

2.4 腔面膜反射率的优化

激光器出光面的外微分量子效率可表示为

$$\eta_a = \eta_i \times \frac{\ln(1/R_1)}{\ln(1/R_1R_2) + 2L\alpha_i}, \quad (1)$$

式中 η_a 为外微分量子效率, η_i 为内微分量子效率, R_1 为出光面的反射率, R_2 为激光器另一个腔面的光反射率, L 为激光器腔长, α_i 为内吸收系数。根据函数关系,激光器腔面膜的设计原理为:1)高反膜的反射率应尽可能提高,提高反射率有利于提高激光器的性能;2)增透膜在不同腔长下对激光器的影响不同,而且当固定高反膜反射率时,随着增透膜反射率的降低,激光器的斜率效率会提高,但其阈值电流也会提高。因此,在设计激光器增透膜时,应该根据需要,在满足较高斜率效率的情况下,使阈值电流尽可能地低。

图 1 和图 2 分别是激光器高反膜反射率为 98%,增透膜反射率分别取 10%、20%、30%时测试的激光器阈值电流和斜率效率。根据实际测试结果对比,在制作大功率 808 nm 激光器时,采用了高反膜反射率为 98%和增透膜反射率为 10%。

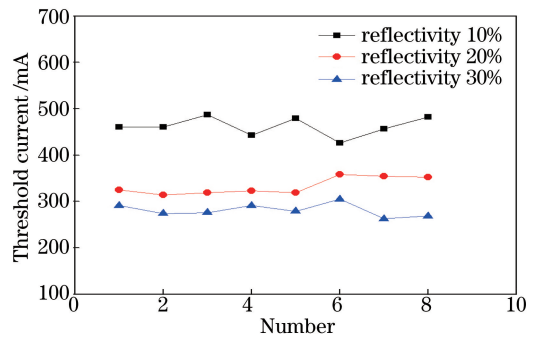


图 1 不同增透膜反射率的阈值电流

Fig. 1 Threshold current of different reflectivity of antireflection film

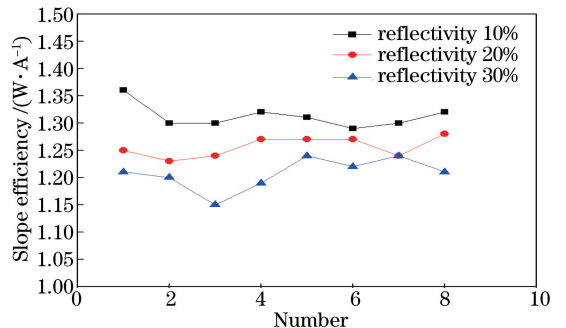


图 2 不同增透膜反射率的斜率效率

Fig. 2 Slope efficiency of different reflectivity of antireflection film

3 实验结果

利用低压金属有机气相外延(LP-MOCVD)进行材料生长。采用高纯 TMGa、TMIn、TMAI 作为 III 族源,纯 PH₃ 和 AsH₃ 为 V 族源,用 H₂ 作为载气;N、P 型掺杂分别用 Si 和 Mg,生长温度为 650~750 °C,生长了 InGaAsP/GaInP/AlGaInP 应变量子阱大光腔结构激光器外延片,进而制作条宽为 150 μm、腔长为 3 mm 的半导体激光器 bar 条,通过优化的离子源辅

助镀膜方法,蒸镀 5 对非标准的 TiO₂/Al₂O₃ 高反膜,单层 Al₂O₃ 增透膜。作为对比,制作了 Si/Al₂O₃ 标准高反膜的普通芯片。最终测试 TiO₂、Al₂O₃ 的粗糙度,其中 TiO₂ 和 Al₂O₃ 的粗糙度分别为 0.23 nm 和 0.394 nm,结果如图 3 和 4 所示。

膜层反射率曲线测试结果如图 5(a)、(b)所示。可以看到,增透膜在 808 nm 处的反射率为 10%,高反膜在 808 nm 附近的反射率可达 98%以上,满足激光器的设计需求。

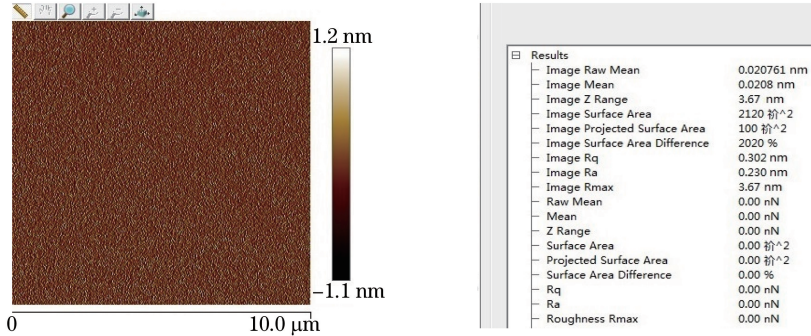


图 3 TiO₂ 薄膜的 AFM 测试结果

Fig. 3 AFM test results of TiO₂ thin film

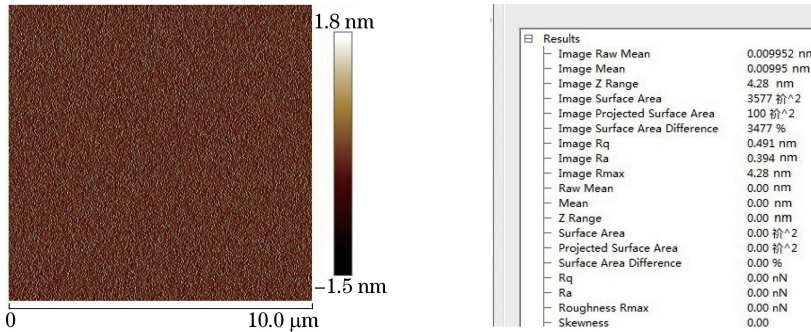


图 4 Al₂O₃ 薄膜的 AFM 测试结果

Fig. 4 AFM test results of Al₂O₃ thin film

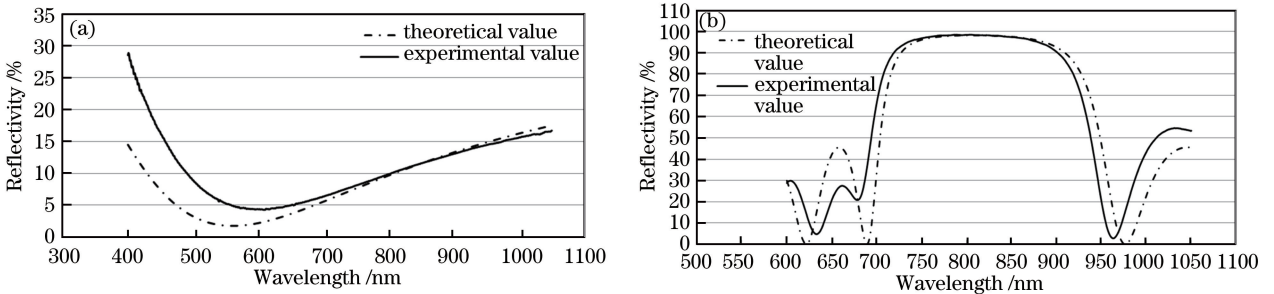


图 5 (a)增透膜反射率曲线;(b)高反膜反射率曲线

Fig. 5 (a) Reflectivity curves of antireflection film; (b) reflectivity curves of high-reflective film

最后将半导体激光器和对比的普通激光器用 AuSn 焊料封装到热沉上。室温连续电流情况下,测得器件的功率输出曲线如图 6 所示。从图中可以看到,采用优化的镀膜方法,其最大输出功率提升到

13.6 W 以上,可能因为封装因素,其中两个器件受热影响功率稍低。而普通器件输出功率只有 10.8 W。

对测试器件腔面进行了分布测试对比,在测试

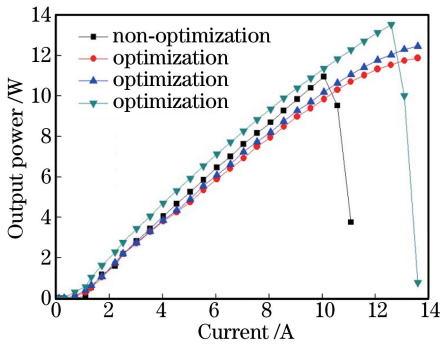
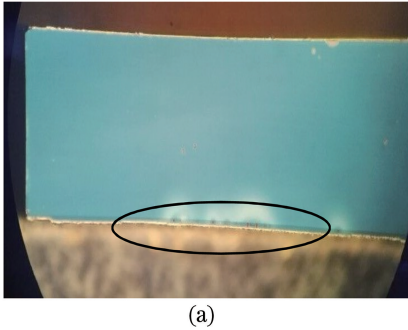
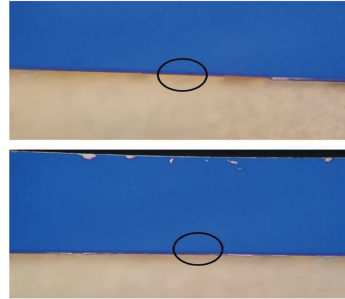


图 6 808 nm 激光器连续功率测试结果
Fig. 6 Continuous power test results of the 808 nm laser

前和小电流测试条件(电流为 4 A)下,激光器腔面无明显变化;在大电流测试(电流为 15 A)下,普通芯片出现 COD,腔面有明显的烧毁痕迹。优化后的



(a)



(b)

图 7 激光器 COD 腔面测试图。(a)优化前;(b)优化后

Fig. 7 COD test results of the facet. (a) Before optimization; (b) after optimization

参 考 文 献

[1] Qu Y, Yuan S, Liu C Y, *et al.* High-power InAlGaAs/GaAs and AlGaAs/GaAs semiconductor laser arrays emitting at 808 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 389-391.

[2] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, *et al.* High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(4): 209-211.

[3] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19

[4] Yanson D, Levi M, Shamay M, *et al.* Facet engineering of high power single emitters[C]. SPIE, 2011, 7918: 79180Z.

[5] Liu Y, Liu H K, Braiman Y. Injection locking of individual broad-area lasers in an integrated high power diode array [J]. Applied Physics Letters,

芯片出现 COD 的器件前腔面有 COD 烧毁痕迹,部分器件出现热饱和现象,腔面无明显变化。腔面情况如图 7 所示。其中图 7(a)为优化前芯片腔面,图 7(b)为优化后芯片腔面情况。可以看到,优化后虽然也出现了 COD,但是烧毁情况有所改变。

4 结 论

根据大功率激光器腔面镀膜损伤机理,通过对镀膜工艺的改进,采用 TiO_2 替换 Si 作为高折射率材料、 Al_2O_3 作为低折射率材料,建立非标准膜系降低电场强度,优化膜层材料蒸发工艺,降低膜层的粗糙度,并采用离子源清洗和助镀,有效提高了激光器的腔面损伤阈值。制作的 $150\ \mu\text{m}$ 条宽 3 mm 腔长的 808 nm 器件,最大连续输出功率达到 13.6 W,而未经优化的器件输出功率只有 10.8 W 左右。

2002, 81(6): 978-980.

[6] Chann B, Nelson I, Walker T G. Frequency-narrowed external-cavity diode-laser-array bar [J]. Optics Letters, 2000, 25(18): 1352-1354.

[7] Tao G T, Lu G G, Yao S, *et al.* Optimized design of cavity facet coatings of 808 nm high power semiconductor laser [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(6): 778-784.
套格套, 路国光, 尧舜, 等. 808 nm 大功率半导体激光器腔面膜优化设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(6): 778-784.

[8] Qi H J, Zhu M P, Fang M, *et al.* Development of high-power laser coatings [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2013, 1(1): 36-43.

[9] Zhang J S, Ning Y Q, Zhang J L, *et al.* Optimization of electric field intensity distribution on high power semiconductor laser facet film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0107001.
张金胜, 宁永强, 张金龙, 等. 大功率半导体激光器腔面膜的场强分布优化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0107001.