

高功率半导体激光器腔面膜的研究

邱忠阳 冯瑞妹 李成龙

大庆师范学院机电工程学院 黑龙江大庆 163712

摘要: 高功率半导体激光器由晶体自解理形成的谐振腔腔面易被损伤且损耗大,对腔面镀膜可以提高激光器的性能、工作的稳定性及寿命。本文介绍了半导体激光器的腔面膜层材料的选择依据及对膜层应用效果进行了归纳总结。

关键词: 高反膜; 反射率; 阈值

引言:

大功率半导体激光器的光学谐振腔有着出光面积小、高载流子密度和高光功率密度的特点。而由半导体晶体自身解理面形成的谐振腔面,反射率低、损耗大、输出功率低,且在半导体激光器工作时,很容易受外界工作环境影响下产生潮解、氧化等情况,并且在腔面附近的自然氧化物诱导缺陷和杂质的非辐射复合等都会影响半导体激光器的性能及寿命^[1]。对半导体腔面进行镀膜可以保护半导体激光器的腔面、防止氧化,有效降低COD阈值、提高激光器的寿命和工作时的稳定性。

一、理论分析

在半导体激光器工作时,需要注入较大电流激发谐振腔产生激光,这样会在腔面上产生大量的非辐射复合,腔内内载流子密度的增加,大量载流子的复合产生的热量并随腔面温度的不断升高而加剧这些会增加内部损耗和降低外量子效率。而要在尽量小的工作电流下,得到较高的输出功率,可以通过降低阈值电流和提高外微分子子效率来实现^[2]。

对于高功率半导体激光器的阈值电流密度可表示为

$$J_{th} = \frac{J_0}{\eta_i} \exp\left(\frac{\alpha_i + \alpha_m}{\Gamma\beta_0 J_0}\right) \quad (1)$$

端面损耗表示为

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_r R_f}\right) \quad (2)$$

阈值电流则为:

$$I_{th} = WLJ_{th} = WL \frac{J_0}{\eta_i} \exp\left(\frac{\alpha_i + (1/2L)\ln(1/R_r R_f)}{\Gamma\beta_0 J_0}\right) \quad (3)$$

外微分子子效率 η_d :

$$\eta_d = \eta_i \left[1 + \frac{2\alpha L}{\ln(R_r R_f)^{-1}}\right]^{-1} \quad (4)$$

其中 J_0 为透明阈值电流密度, η_i 为内量子效率, β_0 为增益系数, Γ 为光学限制因子, α_i 为腔内损耗, R_r 为后腔面反射率, R_f 为出光面的反射率, W 为条宽, L 为腔长^[3]。

通过(3)可以看出,阈值电流 I_{th} 与 $R_r R_f$ 乘积有关, $R_r R_f$ 的值越大, I_{th} 越低; $R_r R_f$ 的值越小, I_{th} 越大; 从而想要获得较低的阈值电流 $R_r R_f$ 的值越大越好。通过(4)式可以看出当激光器的一个后腔面的反射率 R_r 趋于1时,出光面反射率越小,外微分子子效率越高。所以提高后腔反射率 R_r 和降低出光面的反射率 R_f 可以有效的提高外微分子子效率 η_d 。

由上面分析,在制备半导体激光器时,我们可以通过在半导体一个腔面镀增透膜AR作为出光面,另一个腔面镀高反膜HR,来提高激光器的性能^[4]。

二、腔面膜材料的选择和应用

高功率半导体激光器选取膜层材料时,需要考虑膜层的透明度、反射率、机械牢固度和化学稳定性、抗激光损伤及光学损耗等很多因素^[5]。在激光器工作时,腔内产生的强激光极易造成膜层损伤,降低激光器的可靠性,而出光面膜层承受能量更多,容易被破坏的,因为AR膜要承受最大的能量,所以增透膜选取时抗激光损伤尤为重要。增透膜常制备成单层或双层膜层,膜层材料常用有 Al_2O_3 、 SiO_2 等。对于后腔面膜层要实现高反射率,可以通过高、低折射率两种厚度为 $\lambda/4$ 的材料交替形成的多层介质膜来实现,在多层膜系材料选取时,考虑到膜层数越多界面态密度增加、工艺难度加大,所以我们在选取膜层材料时要尽量选取膜层数少且能获得高的反射率的材料组合,常见的膜系组合有 TiO_2/SiO_2 、 ZrO_2/SiO_2 、 $a-Si/Al_2O_3$ 和 $a-Si:H/Al_2O_3$ 等,以下是不同膜层材料应用到激光器上的效果。

1. 金属膜系

基金项目: 大庆市指导性科技计划项目: 半导体激光器谐振腔的优化研究 (zd-2021-21)

作者简介: 邱忠阳 (1984-), 女 (汉族), 吉林松原人, 硕士研究生, 研究方向: 半导体器件。

早期时研究腔面高反射膜大多选择金属膜，这是因为金属膜在红外波段自身的高反射率很高。以GaAs半导体激光器为例，增透膜选择SiO₂高反射膜选择SiO₂/Au，在真空度为 266.7×10^{-5} Pa，基底加热到150℃，采用热蒸发的方法在前后腔面镀制SiO₂，加热电流为20A是，蒸镀4min。只在后腔面镀SiO₂/Au膜激光器的阈值电流就降低了21.4% ~ 34.2%，在前腔面镀SiO₂膜、后腔面镀SiO₂/Au膜后激光器的输出功率提高了40% ~ 66.6%。

继Au之后出现用Ag镀制后腔面的膜系。对808nm GaAs/AlGaAs激光器和1310nm InGaAsP激光器的后腔面镀制ZrO₂/Ag/ZrO₂，用超真空电子束镀膜机在808nm GaAs/AlGaAs激光器和1310nm InGaAsP激光器的后腔面为别镀制164nm ZrO₂+80nm Ag+30nm ZrO₂。经过镀膜后，激光器的阈值电流减小了20% ~ 50%，输出功率提高了60%。对镀膜后的激光器进行老化实验，在-40℃ ~ 70℃的环境温度下，激光器连续工作100h，膜层没有出现衰败的现象，膜系的化学稳定性、热稳定性和牢固性都良好，能够有效的改善激光器的性能，保护激光器的腔面的作用^[6]。但是由于金属的成本较高，所以成本较低的化合物的多层膜系越来越收到关注。

2. HfO₂/SiO₂膜系

HfO₂薄膜具有良好的化学稳定性、熔点高达2900℃，且具有损伤阈值较高，由微观结构引起的散射损耗低等特点，是性能很高的薄膜材料^[7]。SiO₂薄膜具有良好的化学稳定性，用电子束镀制还具有无吸湿性、机械性能牢固等特点。所以HfO₂/SiO₂膜系多选用离子辅助电子束蒸发方法制备。

在808nm GaAs激光器的腔面镀制腔面膜，高反膜为HfO₂/SiO₂膜系结构为Sub/M (HL)⁷H/Air，增透膜为Al₂O₃/SiO₂膜系结构为Al₂O₃/SiO₂Sub/HL/Air。理论计算的前腔面反射率为12.2%、后腔面反射率为97.9%。用离子辅助电子束蒸发方法制备腔面膜，阳极电流2A，阴极电流22A，经过镀膜后激光器的输出功率明显提高，阈值电流变化不大，外微分子量子效率从50.2%提高到的90.4%，功率效率从22.2%提高到39.8%^[8]。

3. SiO₂/TiO₂膜系

SiO₂/TiO₂种膜系组合国外已有将它用于半导体激光器腔面高反膜的报道。SiO₂、TiO₂应两种材料都比较适合用电子束蒸发镀膜的方法制备。

在808nm GaAs激光器腔面镀制腔面膜，高反膜为SiO₂/TiO₂膜系结构为Sub/L (HL)⁵H/Air，增透膜SiO₂膜系结构为Sub/L/Air。用离子辅助电子束镀膜机中，通O₂的条件下分别制备增透膜和高反射膜。镀膜后激光器

的外微分子量子效率平均提高了70%，输出功率平均提高了78%，激光器的性能有很大改善^[9]。同样实验条件下，增透膜选择Al₂O₃膜时，对比镀膜前后，激光器的阈值电流显著下降，斜率效率也大幅提高，但是阈值电流会随Al₂O₃膜厚度增大也增大了，提升激光器性能效果不明显^[10]。

半导体激光器腔面高反射膜系选择SiO₂/TiO₂种膜系，并且合理选择增透膜系，可以有效改善激光器的性能参数，而且SiO₂/TiO₂种膜系具有与GaAs衬底匹配性好，膜层致密、均匀，膜层稳定的特点。

4. a-Si/A1₂O₃膜系和a-Si: H/A1₂O₃膜系

a-Si/A1₂O₃膜系是研究较早、应用较多的膜系，808nm大功率量子阱激光器腔面镀膜常以a-Si/A1₂O₃膜系制备其高反射膜^[11-12]，但是Si膜在808nm处吸收又很强，为了解决这一问题，引入a-Si: H膜，能够有效降低膜系的吸收。

在808nm大功率量子阱激光器腔面镀制腔面膜，高反膜为a-Si/A1₂O₃膜系，膜系结构为Sub/L (HL)³H/Air，增透膜Al₂O₃膜的单层结构。基底温度250℃，真空度小于 1×10^{-6} mbar。只镀高反射膜时，激光器的阈值电流增加，外微分子量子效率降低。前后腔面别的镀制增透膜和高反膜后，激光器的阈值电流略有增加，外微分子量子效率降低。镀膜后激光器的性能下降，a-Si/A1₂O₃膜系的吸收很明显。

以a-Si: H/A1₂O₃膜系为高反膜应用在808nm大功率量子阱激光器腔面上，高反膜为a-Si: H/A1₂O₃膜系结构为Sub/L (HL)³H/Air，增透膜Al₂O₃膜的单层结构。基底温度250℃，真空度小于 1×10^{-6} mbar、通氢气。只镀高反射膜时，激光器的阈值电流就降低了29.2%、外微分子量子效率升高了34.3%。前后腔面别的镀制增透膜和高反膜后，激光器的阈值电流略有增加，但激光器的量子效率和电光转换效率都增加了近一倍。

5. a-Si: H/SiO₂膜系

以a-Si: H/SiO₂膜系为高反膜应用在808nm GaAs/AlGaAs激光器腔面上，高反膜为a-Si: H/SiO₂膜系结构为Sub/L (HL)³H/Air，增透膜SiO₂膜的单层结构。采用磁控溅射法制备a-Si: H膜，衬底温度150℃。经过镀膜后激光器的阈值电流降低了10%，斜率效率提高了17.8%

三、结论

本文对大功率半导体激光器腔面膜的材料选、应用效果进行了归纳、总结。在实际应用中，应全面考虑激光器结构不同、膜层制备工艺不同等因素的影响，对激光器的性能实际改善效果改善也会存在差异。通过对半

导体激光器腔面膜能够提高激光器的性能。

参考文献:

- [1] 半导体激光器腔面钝化的研究[D]. 邱忠阳. 长春理工大学, 2010.
- [2] 半导体激光器腔面膜激光损伤阈值的研究[D]. 李莎. 北京工业大学, 2017.
- [3] 现代光学薄膜技术[M]. 浙江大学出版社, 唐晋发等, 2006.
- [4] 大功率GaAs基半导体激光器腔面膜一次性制备技术[J]. 芦鹏, 李再金, 曲轶, 马晓辉. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014(06).
- [5] GaSb基激光器腔面膜的材料选取及膜系设计[J]. 高婷, 曲轶, 徐正文, 王鑫, 李再金. 强激光与粒子束, 2014(01).
- [6] 半导体激光器后腔面高反射涂层的研究[J]. 吴根柱, 齐鸣, 叙安怀, 张永刚, 李爱珍. 功能材料与器件学报, 2003(03).
- [7] 电子束蒸发制备HfO₂薄膜的性能研究[J]. 张红鹰, 吴师岗, 杜健. 硅酸盐通报, 2014(05).
- [8] HfO₂/SiO₂薄膜的激光预处理作用研究[J]. 卫耀伟, 张哲, 刘浩, 欧阳升, 郑轶, 唐耿宇, 陈松林, 马平. 强激光与粒子束, 2013(12).
- [9] GaAs半导体激光器腔面膜的制备[J]. 韩旭. 硅谷, 2012(11).
- [10] 不同工艺条件下TiO₂单层膜的吸收和损伤阈值测试[J]. 徐俊海, 赵元安, 邵建达, 范正修. 中国激光, 2012(04).
- [11] 808nm掺铝半导体激光高损伤阈值腔面膜制备[J]. 李再金, 胡黎明, 王焯, 杨晔, 彭航宇, 张金龙, 秦莉, 刘云, 王立军. 红外与激光工程, 2010(06).
- [12] GaAs半导体激光器腔面膜的制备[J]. 韩旭. 硅谷, 2012(11).
- [13] Improvement of sub-threshold current models for a-Si: H thin-film transistors. WANG Li-juan, ZHU Jiang, LIU Chun-Ling et al. solid-state electronics, 2007, 51: 703-707.
- [14] a-Si: H/SiO₂多量子阱材料制备及其光学性能和微结构研究[J]. 马小凤, 王懿喆, 周呈悦. 物理学报, 2011(06).
- [15] Computational generation of voids in a-Si and a-Si: H by cavitation at low density[J]. Enrique Guerrero; David A. Strubbe. Physical Review Materials. 2020.3.