

高亮度半导体激光器腔面膜的研究

王宏明¹ 付秀华² 张恩杰¹

(¹ 白城师范学院物理系, 吉林 白城 137000; ² 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130022)

摘要 要降低半导体激光器阈值电流密度和提高外微分子效率, 其中采取的主要方法之一是在发光芯片的两个端面选取适当的能量反射比。根据光学薄膜的设计理论, 优化膜系结构, 并采用电子束离子辅助蒸发技术, 选取合适的薄膜材料, 在条宽 100 μm , 腔长 1 mm 的 850 nm 半导体激光器发光芯片的两个端面沉积光学介质膜。其作用不仅获得一定的光谱特性, 而且可以使发光腔面钝化。经过反复实验优化薄膜沉积的工艺参量, 可以减少膜层材料的吸收, 提高膜层的激光损伤阈值。经测试采用此方法制作出的高亮度半导体激光器使用寿命明显提高, 发光芯片的输出功率可达 3.7 W, 与未镀膜的器件相比功率提高了 2.8~3.1 倍。

关键词 激光技术; 高亮度半导体激光器; 腔面膜; 光学灾变; 阈值电流密度

中图分类号 TB43 **文献标识码** A

Study of High-Luminescence Semiconductor Laser's Film

Wang Hongming¹ Fu Xiuhua² Zhang Enjie¹

¹ Department of Physics, Baicheng Normal School, Baicheng, Jilin 137000, China

² College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract One major method to decrease threshold current density of the semiconductor laser and enhance the deferential exterior of the quantum-efficiency is choosing desirable reflectance of light on both ends of light-emitting chip. This paper provides the contents of optimizing coating system based on optical thin film design theories. The design of optical thin film is prepared with desirable materials, assisted with electron-beam evaporation technology. The optical dielectric film was deposited on two end surfaces of light-emitting chip which has 100 μm stripe width and 1mm length in semiconductor laser. Through the process, it obtains the specific properties of optical spectrum as well as obtuse light emitting vertical cavity surface. It decreases material absorption and enhances laser damage thresholds through optimizing parameters of optical film deposition. After testing, the output power of the high-luminous semiconductor laser's luminous CMOS chip is improved to 3.7 W. The power has been raised by 2.8 to 3.1 times than the uncoated apparatus.

Key words laser technique; high bright semiconductor laser; facet passivation, catastrophic optical damage; threshold current density

1 引 言

850 nm 半导体激光器作为大气窗口和空间通信的主要发光光源, 要求具有高的输出功率和光束质量。而高亮度、高功率的半导体激光器也被广泛用于军事方面, 比如替代小功率固体激光器用于激光制导、测距等方面的应用^[1]。在激光空间通信中, 作为独立发射光源, 要求高亮度半导体激光器具有高稳定性和长寿命等。

高亮度半导体激光器的特点是单位面积上光功

率密度大, 易引起激光器表面的光学灾变 (COD)^[2]。导致光学灾变的因素是半导体激光器中电子和空穴在腔面附近的非辐射复合及受激发射光子的再吸收。影响半导体激光器的最大输出功率和器件寿命的一个主要因素是光学灾变现象。由于在半导体激光器表面存在较高的非辐射复合速率, 因此半导体激光器表面的温度较高, 这又导致阈值电流的升高。由于表面局部过热, 导致半导体激光器的光学灾变。

半导体激光器实现高亮度输出的关键技术之一是在解理后的腔面镀膜。近年来半导体激光器发光芯片的腔面镀膜技术国内外有很多报道^[3-7],绝大部分是在腔面镀介质膜。本文采用离子辅助沉积的方法,选取两种复合材料制备腔面膜。

2 理论分析

对于半导体激光器而言,反映激光器性能的参量主要有阈值电流、斜率效率、输出功率及光学灾变。要想在尽量小的工作电流下得到尽可能高的输出功率,就要降低阈值电流或提高斜率效率。

在应用时,总是把激光器芯片的一个端面镀增透膜作为前腔面(出光面),另一端镀高反射膜作为后腔面(反射面)。一般情况下,量子阱半导体激光器总的外微分量子效率 η_e 、阈值电流密度 J_{th} 及阈值电流 I_{th} 之间存在以下关系:

$$\eta_e = \eta_i \frac{1/(2L)\ln(1/R_f R_r)}{\alpha_i + 1/(2L)\ln(1/R_f R_r)}, \quad (1)$$

$$J_{th} = \frac{J_0}{\eta_i} \exp\left[\frac{\alpha_i + 1/(2L)\ln(1/R_f R_r)}{\Gamma\beta_0 J_0}\right], \quad (2)$$

$$I_{th} = LWJ_{th}, \quad (3)$$

其中 η_i 为内量子效率, α_i 为内损耗, L 为腔长, W 为有源区宽度, R_f 、 R_r 分别为前腔面和后腔面的能量反射比, J_0 为透明阈值电流密度, β_0 为增益系数, Γ 为微观限制因子。

由(1)~(3)式可知,如果要降低阈值电流密度 J_{th} ,则应使 R_f 、 R_r 之积越大越好。若要提高外微分量子效率 η_e ,则应使前腔面能量反射比 R_f 越小越好,而后腔面能量反射比 R_r 越大越好。所以,要降低阈值电流密度 J_{th} 、又要提高外微分量子效率 η_e ,就必须选取适当的能量反射比 R_f 和 R_r ^[7]。

3 膜系设计

高反射膜是构成激光谐振腔的重要部件之一,同时在激光的发射和转折中也用高反射膜作反射器,所以反射膜是激光技术中很重要的组成部分。

我们知道,在激光器的平行平面腔中的品质因子 Q

$$Q = \frac{2\pi\gamma nL}{(1-R)c}, \quad (4)$$

式中 γ 为激光的频率, n 为工作物质的折射率, L 为谐振腔的长度, R 为高反射膜的反射率, c 为光速。

由(4)式可知,反射镜的反射率 R 越大,则 Q 值越大,也就是损耗越小,激光器也就越容易产生振

荡。但如果两端均采用高反射镜,虽然容易产生振荡,但大量的激光能量被限制在谐振腔内,不能输出。因此必须合理地选择谐振腔输出端反射镜的透射率。在一定条件下,反射镜之间存在一个最佳耦合条件。所以谐振腔必定需要一块反射率很高的反射镜和一块有一定反射率同时有一定透过的反射镜构成。此外,要求反射镜本身吸收和散射损失尽可能小,以减少激光在腔内的损失。

如果 n_H 和 n_L 是高、低折射率层的折射率,并使介质膜系两边的最外层为高折射率层,其每层的厚度均为 $\lambda_0/4$,根据周期性多层膜公式,对中心波长 λ_0 有

$$Y = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2s} \cdot \frac{n_H^2}{n_g}, \quad (5)$$

式中 n_g 是基片的折射率, $2s+1$ 是多层膜的层数。故在空气中垂直入射时,中心波长 λ_0 的反射率,即极大值反射率为

$$R = \left[\frac{1 - (n_H/n_L)^{2S}(n_H^2/n_g)}{1 + (n_H/n_L)^{2S}(n_H^2/n_g)}\right], \quad (6)$$

n_H/n_L 比值愈大,或层数愈多,则反射率 R 愈高。

由光学薄膜的有关设计理论可知,高反射膜的获得可由高、低折射率两种材料的交替介质膜组成,可用GHLHLHLHA表示。其中G和A代表入射介质和出射介质(空气),H和L代表光学厚度为 $\lambda/4$ 的高、低折射率膜层。

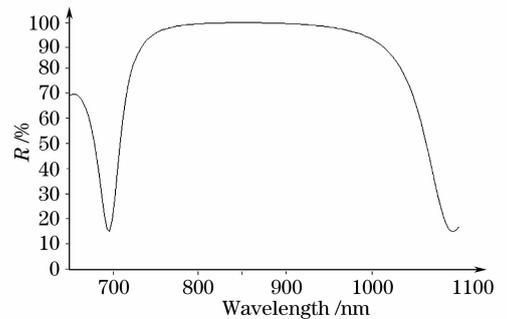


图1 高反射膜系的理论曲线

Fig. 1 Theory curve of high-reflection film

半导体激光器腔面膜的材料种类繁多,对于高反射膜常用的高折射率材料主要有 Ta_2O_5 、Si、 HfO_2 ,低折射率材料主要有 SiO_2 和 Al_2O_3 。

在此选择L代表 Al_2O_3 ,H代表Si,膜系为 $AlGaAs|Si-3(LH)|Air$ 。

与常规膜系不同的是在基底上先沉积一层Si,这是因为从材料方面考虑,Si与 $AlGaAs$ 的晶格常数比较接近,两者的晶格失配小,并且折射率很接近($n_{Si}=3.4$, $n_{AlGaAs}=3.5$),在芯片端面镀制一层Si

膜,对光学性能影响较小,而且可以提高腔面膜的附着力和牢固度。而且 Si 膜在氢离子的环境中沉积,形成 Si-H 键,保护端面不被继续氧化,达到钝化的作用。

膜系的理论设计曲线如图 1 所示。

减反射膜选取 Al_2O_3 镀膜材料,膜层厚度为 $\lambda/4$ 单层膜,理论曲线如图 2 所示。

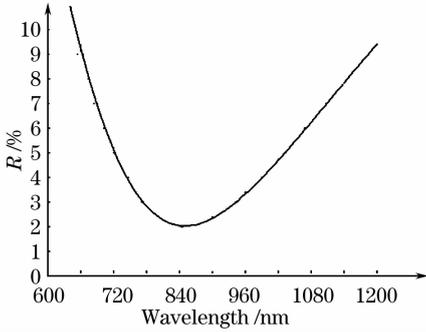


图 2 增透膜的理论曲线

Fig. 2 Theory curve of anti-reflection film

4 工艺实验

实验是在 Integrete 36 型号的镀膜机上进行的。首先将解理好的半导体芯片条装入特制的夹具中,放入真空室内。当真空室的压强达到 2.67×10^{-4} Pa 时,开始镀膜。

在多层膜的制备中,提高基底温度对改进膜层之间的结合性能提高多层膜的机械牢固性很有意义。在制备 Si- Al_2O_3 薄膜时,如果基底不加热或基底温度不够高,则膜层本身硬度较低,与基底结合也不好,常常会发生内应力过大而引起膜层的破裂。基底加热 $70 \sim 150$ °C 制备的 Si- Al_2O_3 薄膜,机械强度很高与基底结合良好。

另外,在制备过程中,氢气的充入量对 Si 膜的折射率影响很大,一般氧化物的光学性质对真空度的依赖关系很强,往往由于真空度的变化导致薄膜光学性质的不稳定。一般的薄膜在真空室放气后其折射率都有增加的倾向。氧化物则更加明显。造成光学薄膜这种特性的主要原因是,薄膜具有多孔结构,暴露在大气中后,大气及水气充入薄膜孔洞,导致折射率的变化。一般来讲,在制备薄膜时,真空度越低,这种变化越大,真空度越高,这种变化越小。经过试验,氢气的充入量在 20 CCM 时, Si 膜的折射率为 3.48 左右,接近理论值。

在沉积的过程中,采用 CC105 离子辅助沉积系统,可以改善成膜的结构,增加薄膜的致密性和附着

力,减少材料的吸收,提高膜层的机械强度。

采用 UV-3100PC 分光光度计测试器件的光谱特性曲线,如图 3 和图 4 所示。

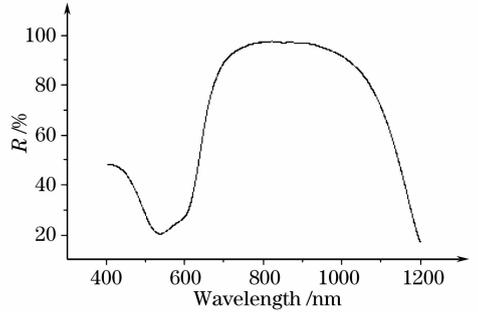


图 3 实测高反射膜的反射率曲线

Fig. 3 Tested curve of high-reflection film

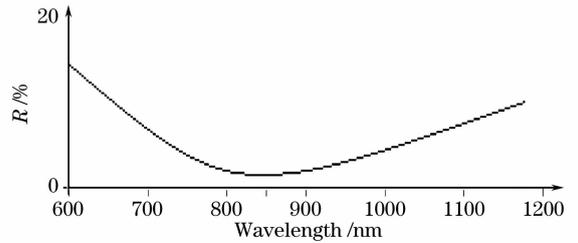


图 4 实测减反射膜的反射率曲线

Fig. 4 Tested curve of anti-reflection film

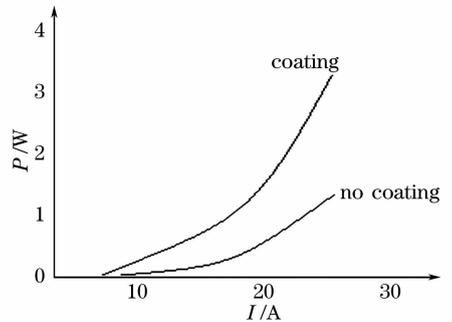


图 5 镀膜前后激光器输出功率的比较

Fig. 5 Output power of the chip compared with the uncoated apparatus

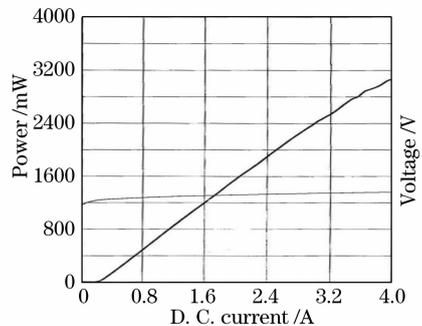


图 6 实测激光器芯片的 P-I, V-I 曲线

Fig. 6 P-I and V-I curves of the laser bar at 850 nm

将镀好的芯片条解理成 $100\mu\text{m}$ 宽度,然后封装制作成激光器,测试其综合指标如图 5 和图 6 所示。

5 结 论

从测量结果可知,后端面的高反射膜反射率达到 97.2%,前端面的减反射膜反射率为 2.5%,激射波长为 850.7 nm,经测试器件的光学灾变损伤阈值得到了明显的提高并且器件寿命明显延长。在芯片解理过程中,腔面的缺陷是不可避免的,另外工艺的重复性很难控制。实际上,薄膜材料的吸收与镀膜工艺密切相关,直接影响光学灾变的值。

参 考 文 献

- 1 Xin Guofeng, Qu Ronghui, Fang Zujie *et al.*. New development of high power semiconductor laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 3~8
辛国锋,瞿荣辉,方祖捷等. 大功率半导体激光器的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(2): 3~8
- 2 Cheng Dongming, Song Xiaoshu, Liu Yun *et al.*. Catastrophic optical damage in laser diode[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, **23**(2): 87~89
程东明,宋晓舒,刘云等. 半导体激光器中的光学灾变[J]. *半导体光电器件*, 2002, **23**(2): 87~89
- 3 Shu Xiongwen, Xu Chen, Xu Zuntu *et al.*. Technology of optical film of 808 nm high power semiconductor laser cavity surface[J]. *Chinese J. Semiconductor*, 2005, **26**(3): 571~575
舒雄文,徐晨,徐遵图等. 808 nm 大功率半导体激光器腔面光学膜工艺[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(3): 571~575
- 4 Nicolas Wiedmann, Juergen Jandeleit, Dieter Hottmann *et al.*. Defects and degradation of InGa(Al)As/GaAs high power diode lasers[C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 90~95
- 5 Li Zhonghui, Wang Yuxia, Wang Ling *et al.*. 850 nm Al-free active-region high power SCH-SQW laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(1): 5~6
李忠辉,王玉霞,王玲等. 850 nm 有源区无铝高功率 SCH-SQW 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **29**(1): 5~6
- 6 Tao Getao, Yao Shun, Zhang Yunpeng *et al.*. Fabrication of 808 nm SQW semiconductor laser facet AR HR coating[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2005, **34**(1): 25~28
套格套,尧舜,张云鹏等. 808 nm 大功率半导体激光器腔面膜的制备[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 25~28
- 7 Tang Tingting, Wang Rui, Liu Gangming *et al.*. Plating film on facets of 808 nm semiconductor laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(2): 167~169
唐婷婷,王锐,刘刚明等. 808 nm 激光器端面镀膜技术[J]. *半导体光电*, 2006, **27**(2): 167~169