

808nm 大功率半导体激光器腔面光学膜工艺*

舒雄文 徐 晨 徐遵图 朱彦旭 沈光地

(北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 用电子束蒸发离子辅助镀膜方法为 808nm 大功率半导体激光器镀制了 SiO₂/TiO₂ 高反膜及 SiO₂ 或 Al₂O₃ 减反膜, 结果表明镀膜后激光器外微分子量子效率明显提高(由 0.7 提高到 1.24), 而且可在一定范围内调节阈值电流密度, 器件寿命也有很大提高. 对这种方法所镀制的 SiO₂/TiO₂ 膜用作 808nm 半导体激光器高反膜的可行性进行了分析和探讨, 认为是一种可行的方法.

关键词: 离子辅助镀膜 (IAD); 阈值电流密度; 微分子量子效率

PACC: 4255P; 7865; 8115J

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)03-0571-05

1 引言

808nm 大功率半导体激光器是目前国际上商用蓝光激光器的主要泵浦源, 它在工业、激光医学、光存储、军事等方面有着广阔的应用前景. 这种激光器未镀膜时解理面的反射比为 0.31 左右, 并非一理想值, 而且解理面在空气中易氧化, 易沾污, 对器件特性的影响非常严重. 为了改善这些不足, 通常会对它的两个端面进行镀膜. 半导体激光器腔面镀膜常用的增透膜材料为 Al₂O₃ 和 SiO₂, 常用的高反膜材料为 Al₂O₃/Si^[1~4]. 我们选用的高反膜系组合为 SiO₂/TiO₂, 对这种膜系组合, 国外已有将它用于半导体激光器腔面高反膜的报道, 国内虽然也有较多的将这种膜系用于激光高反射镜, 或是用普通的蒸发工艺为半导体激光器镀制这种腔面膜的报道, 但是将它成功用于半导体激光器腔面高反射膜尚未见报道, 这可能跟国内的工艺方法有关系. 因为常规的电子束蒸发所得的薄膜结构松散, 容易吸潮, 质量不高, 不能满足半导体激光器腔面膜的要求. 为了克服电子束蒸发的不足, 有人提出用 ECR plasma CVD 法制备这种膜^[5], 但该法制备的膜厚的均匀面积仅为几英寸, 不适宜大批量生产. 本文采用了电子束蒸

发离子辅助镀膜, 它可克服 ECR plasma CVD 的不足, 而且许多文献都曾报道, 这种方法所得的薄膜结构致密, 光学性能稳定^[6,7].

2 理论分析

微分子量子效率和阈值电流密度是半导体激光器两个重要的特性参数. 一般情况下, 量子阱半导体激光器总的外微分子量子效率 η_e 、阈值电流密度 J_{th} 及阈值电流 I_{th} 可表示为^[8,9]:

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

$$J_{th} = \frac{J_0}{i_i} \exp\left[\frac{i_i + 1/(2L)\ln(1/R_f R_r)}{0 J_0}\right] \quad (2)$$

$$I_{th} = L W J_{th} \quad (3)$$

其中 i_i 为内量子效率; i_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(出光面)和后腔面(背面)的能量反射比; J_0 为透明电流密度; 0 为增益系数; 0 为光限制因子.

实际应用的激光器总是一个腔面镀增透膜 AR 作为出光面, 另一个腔面镀高反膜 HR 作为背面. 出光面的微分子量子效率, 即我们通常所说的激光器的微分子量子效率(斜率效率)为:

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号: G200068302)

舒雄文 男, 1974 年出生, 博士研究生, 从事光学薄膜和半导体光电子器件研究.

徐 晨 男, 1958 年出生, 教授, 从事半导体光电子器件和高速器件的研究.

2004-04-15 收到, 2004-07-07 定稿

$$\eta_i = \frac{1/(2L)\ln[1/(R_f)]}{i + 1/(2L)\ln[1/(R_f R_r)]} \quad (4)$$

未镀膜时, $R_f R_r = 0.095$ (设 GaAs 折射率为 3.5, 空气折射率为 1).

显然, 由(2)式可以看出, 当 R_f, R_r 之积在镀膜前后相等时 ($= 0.095$), 阈值电流密度 J_{th} 不变; 当二者之积变小时 (< 0.095), J_{th} 变大; 当二者之积变大时 (> 0.095), J_{th} 变小. J_{th} 的变化与 I_{th} 的变化有同样的趋势.

由(3)式可以看出, 减小出光面的反射比 R_f 或增大背面反射比 R_r 都可以提高出光面的微分子效率 η_i .

由上面的分析可知: 若要降低 J_{th} , 则应使 R_f, R_r 越大越好; 若要提高 η_i , 则应使 R_f 越小, R_r 越大越好; 若既想降低 J_{th} 又想提高 η_i , 必须选取适当的 R_f , 即要对 R_f 进行优化. 我们根据以上原理做了一系列实验, 并对所做的激光器进行了优化. 按照习惯, 下面我们将微分子效率 η_i 用 E_s 表示.

3 实验及结果

文中所选用的镀膜设备为 Denton Vacuum 的 Infinity26 真空镀膜机, 它配有冷阴极离子源及石英晶振监控和光学监控系统, 蒸发过程完全由计算机

自动监控.

本文涉及的实验中所选用的管芯腔长全部为 $750\mu\text{m}$, 工作电流为 500mA.

实验 1: $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 高反 + SiO_2 减反, 改善激光器的 E_s, I_{th} 等

将解理好的激光器条若干迅速装入镀膜机, 使一个腔面垂直向下, 关闭真空室门, 抽真空至 $1.2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$. 先在一个腔面镀 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ (膜系结构为: sub/L HL HL HL HL HL H/air), 然后翻面镀 SiO_2 增透 (结构为: sub/L/air). 在镀增反膜及镀增透膜时都将氧气通入离子源, 进行氧离子辅助镀. 实验结果如图 1, 2 所示.

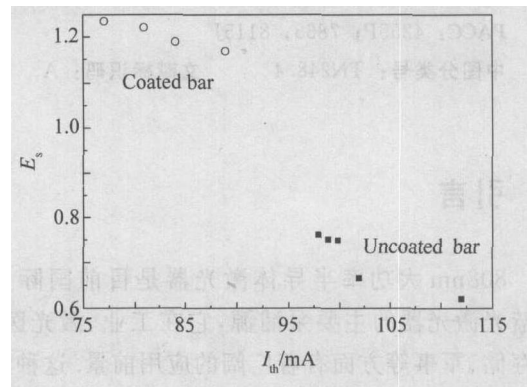


图 1 镀膜和未镀膜激光器外量子效率和阈值电流比较
Fig.1 Comparison of the E_s and I_{th} of the coated and uncoated lasers

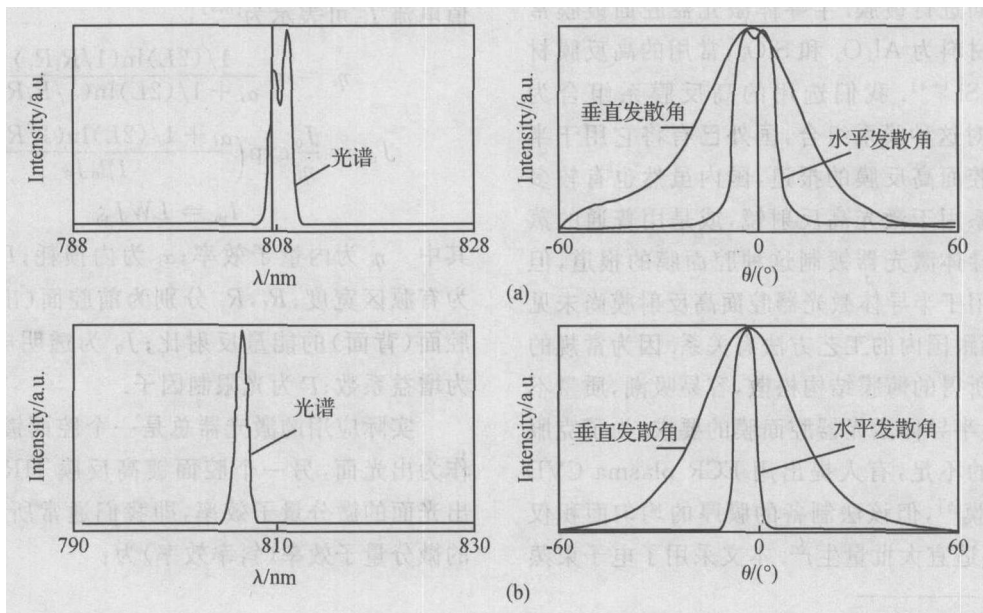


图 2 镀膜前后典型的光谱和远场比较 (a) 镀膜前; (b) 镀膜后

Fig.2 Comparison of typical spectrum and far field of the coated and uncoated laser (a) Uncoated; (b) Coated

从以上数据可以看出,离子辅助镀膜后激光器的斜率效率、阈值电流进而推知阈值电流密度、输出功率都有很大的改善(斜率效率平均提高了 70%,输出功率平均提高了 78%),而光谱特性及远场也有明显改善.

实验 2: SiO₂/ TiO₂ 高反 + Al₂O₃ 减反,不同的前腔面反射比对 E_s, I_{th} 的影响

将解理好的激光器条 bar1, bar2, bar3 迅速装入镀膜机,使一个腔面垂直向下,关闭真空室门,抽真空至 1.2×10^{-3} Pa. 先在一个腔面镀 20nm Al₂O₃ 作为钝化层,然后翻面在另一个腔面镀 20nm Al₂O₃,并接着镀 1/4 波长膜 SiO₂/ TiO₂ 4 对,先镀 SiO₂,镀好后打开真空室,将镀好的激光器条取出,并分批对 bar2, bar3 镀不同厚度的 Al₂O₃ 增透膜,以获得不同的前腔面反射比.除了刚开始在激光器两个端面镀 Al₂O₃ 时不用离子源,在镀 SiO₂ 和 TiO₂ 以及镀增透膜时都将氧气通入离子源,进行氧离子辅助镀.这几批管芯的 I_{th} 和 E_s 实验结果如图 3 所示(bar0 为未镀膜管芯).

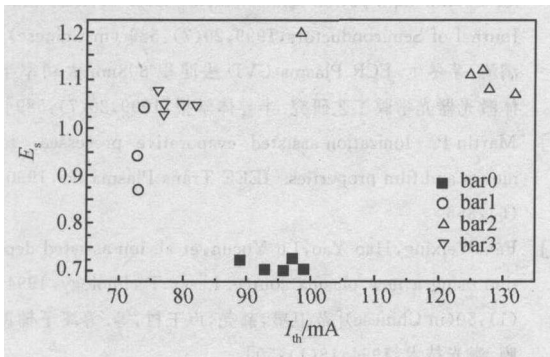


图 3 调节前腔面反射比导致的外量子效率和阈值电流的变化

Fig. 3 Changes of E_s and I_{th} with the adjusting of front facet reflectivity

用 PE 公司的 Lambda 900 分光光度计对 bar1 的高反膜、bar2 和 bar3 增透膜的反射谱的测量结果表明,在 808nm 处,bar1 高反膜的反射比 R_f 约为 90.4%,bar2 前腔面的反射比 R_f 约为 29%,bar3 前腔面的反射比 R_f 约为 5%.

从上面的测试结果很容易看出:(1) 只在背面镀高反膜,激光器的斜率效率有较大提高,阈值电流密度有较大下降,如 bar 1;(2) 在背面镀与 bar 1 同样的高反膜,同时在前腔面镀增透膜,但只是稍微有点增透,斜率效率又有一定提高,而阈值电流密度稍微有点增大,但幅度都不大,如 bar 2;(3) 在背面镀

与 bar 1 同样的高反膜,同时在前腔面镀增透,且增透程度较高,则斜率效率又稍微有点提高,而阈值电流密度增长幅度很大,比没有镀膜的管芯的阈值电流密度还要大很多.

从以上实验数据可以看出,实验结果与理论分析及膜系设计趋势一致.这说明完全可以利用离子辅助镀膜来较好地控制激光器的斜率效率、阈值电流和输出功率等特性.

实验 3: IAD 镀膜工艺所得 SiO₂, TiO₂, TiO₂/ SiO₂ 膜层重复性、均匀性

用同样的 O₂ 离子辅助方法依次对 5 个不同基片镀单层 TiO₂ 膜,反射谱测量表明其波长重复性为 0.001;同样的工艺方法对 5 个不同基片镀 TiO₂/ SiO₂ 双层膜,反射谱测量表明波长重复性为 0.004.这说明用离子辅助方法所得的 TiO₂ 或 TiO₂/ SiO₂ 膜的光学厚度重复性很好.

在真空室基片架 8 个不同位置各放一个基片,然后抽至高真空,用氧离子辅助镀 TiO₂ 膜,然后取出样品用椭偏仪分别测折射率,发现其折射率的均匀性为 0.0019.而对 SiO₂ 膜,测得的折射率均匀性为 0.0012.这表明离子辅助沉积所得的 TiO₂ 膜和 SiO₂ 膜的折射率的均匀性是很好的.

实验 4: IAD 所镀 SiO₂/ TiO₂, Al₂O₃, SiO₂ 膜层稳定性及对寿命的影响

用分光光度计测量镀好的 SiO₂/ TiO₂ 高反膜的透射谱,然后将其放入去离子水浸泡 9h 后取出,吹干表面,再测透射谱,结果发现两次的谱线几乎完全重合,如图 4 所示.这说明了这种离子辅助沉积所镀的 SiO₂/ TiO₂ 膜非常致密,湿度稳定性很好.

将分别镀有 Al₂O₃, SiO₂ 和 SiO₂/ TiO₂ 的几个 GaAs 基片放入合金炉,5s 由室温升至 650,并保持此温度 2min,然后降温取出,在显微镜下观察,未发现“起泡”现象或裂纹,与放入合金炉前观察到的结果一样.这说明离子辅助沉积所得到的这些膜的热稳定性是很好的,同时也说明了所得到的这些膜与 GaAs 之间的匹配很好,膜的附着力很强.

在分别镀有 Al₂O₃, SiO₂, SiO₂/ TiO₂ 的几个 GaAs 基片的膜上贴上强力胶带,然后将胶带扯下,在显微镜下观察,未发现膜有变化.再一次说明了这些膜与 GaAs 之间的匹配很好,膜的附着力很强.

折射率的测量表明,用离子辅助镀所得的 SiO₂ 膜的折射率可达 1.49,而普通的电子束蒸发所得的这种膜的折射率只有 1.43,这说明离子辅助镀所得

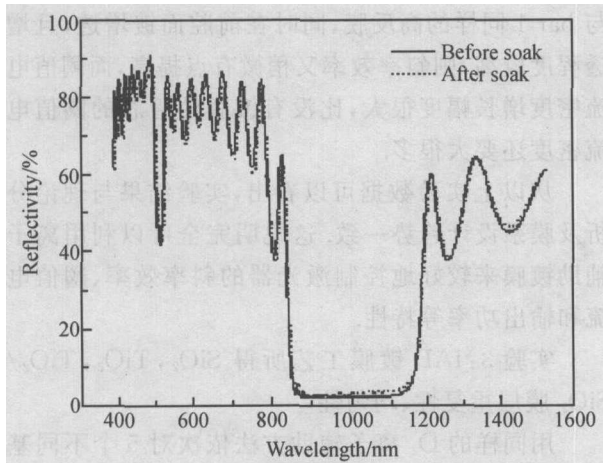


图 4 离子辅助镀所得高反膜的湿度稳定性

Fig. 4 Moisture stability of high reflection layers by ion assisted deposition

薄膜确实比普通电子束蒸发所得要致密。

对同一批管芯做了如下实验,将其中的一部分没有镀膜加大电流直接老化,结果寿命只有几十小时;将另一部分用前面所讲的工艺方法镀上 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 高反膜及 Al_2O_3 增透膜,加与前一同样大的电流老化,寿命长的已经超过 1000h 特性仍然比较好.这说明用这种工艺方法对 808nm 大功率半导体激光器镀上 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 高反膜及 Al_2O_3 增透膜对提高激光器寿命的作用也是很明显的。

4 结论

电子束蒸发离子辅助沉积所镀制的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 膜层作为半导体激光器腔面高反膜并在另一腔面镀增透膜能很好地改善激光器的 E_s , I_{th} 等特性参数.而且这种方法镀制的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 膜层致密,均匀性、重复性好,光学性能稳定; $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 高反膜与 GaAs 匹配很好、与 GaAs 附着力很强.用这种膜系

作为 808nm 大功率半导体激光器腔面光学膜是可行的,且值得尝试。

参考文献

- [1] Shima Y, Chinone N, Ito R. Effects of facet coatings on the degradation characteristics of GaAs-GaAlAs DH lasers. Appl Phys Lett, 1977, 31(9):625
- [2] Kappeler F, et al. Pulsed-power performance and stability of 800nm GaAlAs/GaAs oxide-stripe lasers. IEEE Proc, 1982, 129(6):256
- [3] Tihanyi P, Scifres D R, Bauer R S. Reactive outdiffusion of contaminants from (AlGa)As laser facets. Appl Phys Lett, 1983, 42(4):313
- [4] Li Bingchen, Peng Ye, Liao Xianbo. New dielectric facet reflector for high power 808nm quantum well laser. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(8):698 (in Chinese) [李秉臣, 彭晔, 廖显伯. 808nm 大功率量子阱激光器无吸收腔面镀膜的研究. 半导体学报, 1999, 20(8):698]
- [5] Tan Manqing, Mao Dongsheng. Optical thin film deposition by electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition for 808nm high-power semiconductor laser devices. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(7):589 (in Chinese) [谭满清, 茅冬生. ECR Plasma CVD 法淀积 808nm 大功率半导体激光器光学膜工艺研究. 半导体学报, 1999, 20(7):589]
- [6] Martin P. Ionization-assisted evaporative processes: techniques and film properties. IEEE Trans Plasma Sci, 1990, 18(6):855
- [7] Fan Weixing, Hao Yao, Lu Yucun, et al. Ion-assisted deposition using a new plasma source. Laser Technology, 1994, 18(1):50 (in Chinese) [范卫星, 郝尧, 卢玉村, 等. 等离子辅助镀膜. 激光技术, 1994, 18(1):50]
- [8] Jiang Jianping. Semiconductor laser. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000:87 (in Chinese) [江剑平. 半导体激光器. 北京:电子工业出版社, 2000:87]
- [9] Coleman J J, Beernink K J, Givens M E. Threshold current density in strained layer $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum-well heterostructure lasers. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(10):1983

Facet Coatings for 808nm High-Power Semiconductor Laser Diode *

Shu Xiongwen, Xu Chen, Xu Zuntu, Zhu Yanxu, and Shen Guangdi

(*Opto Electronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

Abstract: The paper introduces the depositing technology of optical thin film — $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ as the high reflective facet for 808nm high power semiconductor lasers by ion assisted deposition, and a good result is obtained (including the increase of external differential quantum efficiency and lifetime, improvement of spectrum and far field character and the decrease of threshold current), then analyses the feasibility of using $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ as the high reflective facet coatings of this kind of lasers and think it is feasible.

Key words: ion assisted deposition; threshold current density; differential quantum efficiency

PACC: 4255P; 7865; 8115J

Article ID: 0253-4177(2005)03-0571-05

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G200068302)

Shu Xiongwen male, was born in 1974, PhD candidate. He is engaged on research on optical films and semiconductor opto-electronic devices.

Xu Chen male, was born in 1958, professor. He is engaged on research on semiconductor opto-electronic devices and high-speed devices.

Received 15 April 2004, revised manuscript received 7 July 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics