

半导体激光器高反膜系参数的模拟仿真分析

马钰慧¹, 邱伟彬¹, 苏道军¹, 王加贤¹, 崔碧峰², 王晓玲²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 北京工业大学 北京市重点光电实验室, 北京 100022)

摘要: 分析制备半导体激光器高反膜系中出现的中心波位置偏移和峰值偏移现象, 利用 TFCalc 软件对实验参数进行模拟仿真, 得到中心波位置和峰值与膜厚偏差、膜料折射率变化的具体关系. 研究表明: 膜厚变化只能影响中心波的偏移, 而不能影响峰值的大小, 膜厚增大则中心波红移, 膜厚减小则中心波蓝移; 折射率变化会影响中心波位置和峰值的大小两个值, 但折射率偏差 3% 已经是较大值, 故折射率偏差对中心波位置的影响不会太大.

关键词: 半导体激光器; 中心波; 偏移; 高反射膜; 镀膜

中图分类号: TU 360.2

文献标志码: A

近年来, 激光器技术发展迅速^[1], 其应用越来越广泛, 输出的波长范围越来越宽, 从可见光(590~780 nm)、近红外(780~910 nm)到长波长(1~30 μm)均实现了受激光辐射^[2]. 普通的边发射半导体激光器以自然解理面为谐振腔, 其特征是两腔面的反射率相等, 激光在两边的输出功率相等^[3]. 为解决此问题和为端面提供保护, 需要对半导体激光器进行镀膜^[4], 即需要制备高反膜和增透膜. 在制备 900 nm 的 GaAs 基半导体激光器全介质高反膜工艺过程中, 实验得到的高反膜与理论设计出现偏差, 即理论设计的全介质高反膜系中心波反射率大于 97%, 然而实际得到的样品中心波和峰值均发生一定程度的偏移现象, 中心波为 800 nm, 峰值为 95.698%. 对于中心波漂移现象, Weber 等^[5]发现膜层周期厚度偏差是垂直腔面发射半导体激光器布拉格光栅 DBR 反射镜中心波漂移的原因; 张冠杰等^[6]针对 MBE 制备 DBR 反射镜中心波偏移和带宽变窄问题进行了研究; 蔡丽娥等^[7]对 MOCVD 制备 DBR 结构出现的中心波偏移和峰值偏移问题进行研究, 但只是定性的解释, 没有做定量的分析. 目前, 离子束辅助镀膜是较为普遍的光学薄膜制备法. 为解决离子束辅助镀膜中出现中心波偏移和峰值下降的问题, 本文对在制备半导体激光器高反膜系中出现的中心波位置偏移和峰值偏移现象进行研究.

1 全介质高反膜系设计

1.1 理论基础

高反射膜^[8]理论中, 设计周期性多层膜堆时, 需要令每层膜的厚度为 $\lambda_0/4$, 并使介质膜系两边最外层为高折射率层. 对于中心波长 λ_0 的光学导纳, 有

$$Y(\lambda_0) = \left(\frac{n_H}{n_L}\right) \cdot \frac{n_H^2}{n_S} \quad (1)$$

式(1)中: n_H , n_L 和 n_S 分别是高、低折射率膜层和衬底的折射率. 当光线垂直入射时, 对中心波长 λ_0 的反射率有极大值, 即有

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

式(2)中: S 为膜层周期数, 即膜系为 $G|H(LH)^S|A$, G 表示衬底, H, L 分别表示高、低折射率膜层, A

收稿日期: 2012-12-25

通信作者: 王加贤(1955-), 男, 教授, 主要从事光学薄膜的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J0127); 华侨大学高层次引进人才科研启动项目(11Y0299)

表示空气. 由式(2)可知： n_H/n_L 比值越大, 或者层数(2S+1)越多, 则反射率 R 越高. 因此, 从理论上讲, 只要增加膜系的层数, 反射率可无限地接近于 100%.

另一方面, 当膜层数增加时, 高反介质膜的反射率会稳定增加, 而带宽呈现一个逐渐稳定的趋势. 其中周期性多层膜堆的高反射带半波数宽度为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right). \tag{3}$$

由此可知, 高反射带的波数宽度仅仅与构成多层膜的两种膜料的折射率有关, 两种膜料的折射率差值越大, 则高反射带越宽.

1.2 材料的选取

根据设计高性能激光器反射膜的条件^[9], 国外已将 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 膜系组合成功用于半导体激光器高反膜, 国内也有人成功制备 808 nm 半导体激光器腔面高反膜^[10]. 因此, 实验选择材料为 SiO_2 和 TiO_2 .

1.3 膜系设计

实验设计高反膜的要求: 1) 反射率在 97% 以上; 2) 尽量减少膜层数, 以减少误差累加; 3) 设计的厚度容易监控. 根据要求设计的膜系为 $G|\text{H}(\text{LH})^S|\text{A}$. 用 TFC 软件仿真得到设计的 SiO_2 和 TiO_2 的膜厚分别为 150, 98 nm, 中心波长为 900 nm, 反射率为 97.516%.

2 实验结果与分析

利用美国 Woollam 公司的 Vase 型可变入射角光谱椭圆仪测试该薄膜的反射率(R), 得到结果是该薄膜的中心波长(λ)为 800 nm, 峰值(ϵ)大小为 95.698%. 与理论设计相比, 不仅中心波发生了偏移, 而且峰值降低, 其对比如图 1 所示.

实验中出现的問題不只是中心波的偏移, 还有峰值的下降. 产生中心波偏移和峰值变化的原因有 3 点: 1) 膜系带宽变小, 导致中心波及峰值降低; 2) 在镀膜的过程中, 薄膜的厚度控制存在误差; 3) 实际镀制的材料折射率发生了变化. 从膜系设计的理论基础中周期性多层膜堆的高反射带宽只与材料有关, 可知带宽发生巨大变化的可能性比较小, 导致中心波偏移和峰值变化的可能性更小. 因此, 排除第一种可能因素, 着重分析后两种可能性.

由于实验选用的设备是美国 Denton Vacuum 公司的 Infinity 26 型真空镀膜机, 它采用石英晶振监控和光学监控系统控制膜厚的. 一般情况下, 石英监控的误差范围在 2% 以内, 而对于光学监控, 其镀膜薄膜厚度 (Tooling 值) 的变化会引起误差的累积. 在工艺制备过程中, 离子源电压、真空度、设备 Tooling 值的变化都会引起厚度误差, 误差大小范围无法预测. 如果能够确定膜厚的偏差大小, 则可为实验条件及 Tooling 值的调整提供相应的依据. 对于折射率变化, 其值受真空度、离子源电压等因素影响, 但经验所得误差不会超过 3%.

3 模拟仿真分析

3.1 膜厚偏差的仿真

为详细考察膜厚偏差造成的中心波漂移的影响, 采用软件仿真分析, 即保持一种膜料膜厚无偏差, 另一种膜料按偏差间隔 2% 变化. 另外, 在对膜料折射率变化值选择时, 考虑到离子束辅助沉积技术制备 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 光学薄膜中出现的折射率最大偏差值为 3%, 所以仿真中假定折射率变化值为 3%. 表 1 为模拟仿真统计结果.

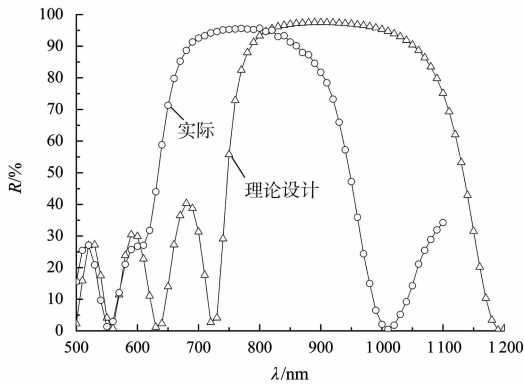


图 1 理论设计与实际的高反膜系光谱反射率曲线对比图

Fig. 1 Comparison chart of spectral reflectance curve between theory design and the actual HR coating

模拟仿真结果表明:当 SiO₂ 膜厚不变,而 TiO₂ 膜以 2%偏差逐渐减小时,中心波向短波方向移动,峰值基本保持不变;反之,中心波向长波方向移动,峰值基本保持不变;同样,当 TiO₂ 保持不变,SiO₂ 膜厚发生变化时,产生的结果一致.从模拟结果可以发现,当 SiO₂ 的膜厚减小 24%时,中心波由理论的 900 nm 移动到 800 nm 处;而当 TiO₂ 的膜厚减小 22%时,中心波由理论的 900 nm 移动到 800 nm 处.具体变化情况如表 1 所示.表 1 中:δ_{SiO₂},δ_{TiO₂} 分别为 SiO₂ 和 TiO₂ 膜厚偏差,正负值表示增大或减小;λ 为中心波长;ε 为峰值.

表 1 SiO₂ 与 TiO₂ 膜厚偏差对中心波和峰值的影响
Tab. 1 Influences of SiO₂ and TiO₂ film thickness deviation on center wave and the peak

δ _{SiO₂} /%	设计值	+2	-2	-4	-6	-8	-10
λ/nm	900	910	890	880	875	865	855
ε/%	97.516	97.516	97.511	97.502	97.492	97.478	97.459
δ _{SiO₂} /%	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24
λ/nm	850	840	830	825	815	810	800
ε/%	97.438	97.411	97.379	97.344	97.303	97.256	97.203
δ _{TiO₂} /%	设计值	2	-2	-4	-6	-8	-10
λ/nm	900	910	890	880	870	865	855
ε/%	97.516	97.501	97.527	97.534	97.540	97.542	97.543
δ _{TiO₂} /%	-12	-14	-16	-18	-20	-22	-24
λ/nm	845	835	825	815	810	800	790
ε/%	97.539	97.532	97.521	97.505	97.489	97.465	97.436

为深入研究中心峰偏移与膜厚的具体函数关系,在 Origin 软件^[11]中对两种膜料中心波位置与膜厚偏差数据点进行线性拟合.经拟合后得到的关系式分别为

$$y_{\text{SiO}_2} = 898.131\ 8 + 410.714\ 2x, \tag{4}$$

$$y_{\text{TiO}_2} = 899.175\ 8 + 454.670\ 3x. \tag{5}$$

二者的相关系数 r 均大于 99.8%,因此该拟合是比较合理的^[12].根据式(4),(5),可以计算出当中心波偏至任意波段时相应的膜厚的偏差值,而后逐步调整 Tooling 因子和改变实验条件的方案.

3.2 折射率偏差的仿真

经分析,可将两种膜料的厚度保持不变,其中一种膜料的折射率发生变化,或偏小 3%或增大 3%进行研究.经 TFC 软件仿真后,折射率变化对中心波位置和峰值大小的关系统计结果,如表 2 所示.表 2 中:Δ*n* 为膜料折射率变化;λ 为中心波长;*R* 为反射率.

表 2 膜料折射率变化对中心波位置和峰值大小的关系
Tab. 2 Influences of film components index changes on center wave and the peak

Δ <i>n</i> /%	不变	TiO ₂		SiO ₂	
		+3	-3	+3	-3
λ/nm	900	910	890	910	890
<i>R</i> /%	97.516	98.015	96.855	96.865	98.038

由表 2 可知,无论高、低折射率,当膜料折射率增大时,中心波均向长波方向偏移;当膜料折射率减小时,中心波向短波方向偏移.不同的是,高折射率物质 TiO₂ 的折射率变化与峰值变化保持一致,而低折射率物质 SiO₂ 折射率变化与峰值变化刚好相反.因此,产生峰值降低的原因是 TiO₂ 折射率降低.

4 结论

研究表明:膜厚变化只能影响中心波的偏移,而不能影响峰值的大小;折射率变化会影响中心波位置和峰值的大小两个值,又由于折射率偏差 3%已经是较大值,所以折射率偏差对中心波位置的影响不会太大.实验中出现的中心波由 900 nm 偏移至 800 nm 处,即移动了 100 nm,同时峰值由理论的 97.516%降低至 95.698%.究其原因可能有两个:一是膜厚发生偏差;二是膜料折射率发生变化.

受工艺条件和膜厚监控 Tooling 的影响,膜厚误差会导致中心波发生偏移,二者间具体的关系式已

得到,但是膜厚误差不会影响峰值大小.此外,TiO₂ 折射率降低对峰值降低影响很大,同时中心波向短波偏移.

这些结论可以推广到其他任何波段出现类似的中心波和峰值偏移问题的解决,为镀膜工艺参数调整提供重要的理论依据.

参考文献：

[1] 王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. 中国激光,2010,37(9):2190-2197.

[2] 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用[J]. 长春光学精密机械学院学报,1997,20(2):56-63.

[3] 郝尧,卢玉村,陈建国. 优化反射率以增强半导体激光器输出功率[J]. 半导体光电,1995,16(2):131-134.

[4] PANCHAI C J,MISTRY S N,PATEL K M,et al. Facet coating of diode laser for high power and high reliable operation[J]. Proc SPIE,2003,4829:18-19.

[5] WEBER J P,MALLOY K,WANG S. Effects of layer thickness variations on vertical-cavity surface-emitting DBR semiconductor laser[J]. IEEE Photon Technol Lett,1990,2(3):162-164.

[6] 张冠杰,舒永春,皮彪,等. AlAs/GaAs 分布布拉格反射镜(DBR)的反射谱拟合与优化生长[J]. 人工晶体学报,2005,34(6):977-981.

[7] 蔡丽娥,张江勇,王启明,等. AlInN/GaN DBR 和 VCSEL 结构参数的模拟优化[C]//第十届全国 MOCVD 学术会议论文集. 广州:华南师范大学,2007:184-189.

[8] 卢进军,刘卫国,潘永强. 光学薄膜技术[M]. 北京:电子工业出版社,2011:22-23.

[9] 卜轶坤,赵丽,郑权,等. 高损伤阈值激光反射镜的设计方法[J]. 红外激光与激光工程,2006,35(2):183-186.

[10] 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.

[11] 李润明,吴晓明. 图解 Origin 8.0 科技绘图及数据分析[M]. 北京:人民邮电出版社,2009:254-256.

[12] 于成龙,郝欣,沈青,等. Origin 8.0 应用实例详解[M]. 北京:化学工业出版社,2010:169-171.

A Simulation Study on the Design Parameters of High-Reflection Coating for Semiconductor Laser

MA Yu-hui¹, QIU Wei-bin¹, SU Dao-jun¹,
WANG Jia-xian¹, CUI Bi-feng², WANG Xiao-ling²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Beijing Municipal Key Optoelectronic Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing, 100022)

Abstract: Problems of center wavelength position shift and peak reflectance variation appeared in high-reflection coating fabrication of semiconductor laser were analyzed and investigated in this paper. Experiment parameters were simulated by using TFCalc software, and the definite relationship between centre wavelength position, the peak reflectance and film thickness error, coating material index change was obtained. The simulation results showed that the film thickness errors influenced the wavelength position rather than the peak reflectance. Increasing film thickness causes the center wavelength red shift, while decreasing film thickness induced the center wavelength blue shift; Index modification of the coating materials affects both the center position and the peak reflectance. Effect of center wavelength position from coating materials index modification in not significant even the index modification is as high as 3%.

Keywords: semiconductor laser; center wavelength; shift; high-reflection coating; coating process

(责任编辑：黄晓楠 英文审校：吴逢铁)