

反射率小于 10^{-4} 的 1310 nm 光电子器件 增透膜技术的研究

谭满清 茅冬生 王仲明

(中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083)

摘 要 阐述了电子回旋共振等离子体化学气相沉积法淀积半导体器件端面光学膜的优良特性, 介绍了淀积反射率小于 10^{-4} 的 1310 nm 半导体激光器端面增透膜技术, 并对这种技术的优点和两端面淀积增透膜后的激光器特性进行了讨论。

关键词 电子回旋共振等离子体化学汽相沉积法, 半导体激光器, 增透膜, 反射率。

1 引 言

镀制反射率小于 10^{-4} 的 1310 nm 半导体激光器端面增透膜是实现 1310 nm 半导体激光器超辐射或荧光的必须条件之一。许多学者曾经用电子束蒸发(E-B)等物理汽相沉积(PVD)方法尝试过镀制这种增透膜, 但因电子束蒸发法淀积的光学膜在大气中吸潮而光学性能改变, 淀积的膜折射率偏差也较大, 所以不容易做出好的结果。

电子回旋共振等离子体化学气相沉积法淀积光学膜的原理是^[1, 2]: 将 2.45 GHz 的微波导入淀积室, 在 875×10^{-4} T 的磁场中, 电子的回旋运动和微波发生共振现象, 电子和被导入的 N_2 、 O_2 、 Ar_2 等气体原子碰撞, 促进电离, 产生等离子体。通入适量的反应气体(如 SiH_4 等)进入反应室的等离子区, 使其在衬底表面进行化学反应, 以达到在衬底表面淀积介质膜的目的。其优点主要表现在: 1) 电子回旋共振产生 30 eV 左右的低能离子^[3], 能有效减小离子轰击 GaAs、InP 等衬底表面所引起的损伤; 2) 电子回旋共振产生 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的离子密度, 比射频放电的离子密度高 100 倍到 1000 倍, 从而有高的淀积速率和好的致密性; 3) 依据实际需要, 通过监控各种气流的大小, 可镀制不同折射率的介质膜; 4) 可精确镀制所需折射率的光学膜, 并有好的重复性和稳定性; 5) 使用石英晶体监控膜厚, 实现光学膜厚的精确控制。以下从膜系设计、实验以及结论和讨论等几方面介绍电子回旋共振等离子体化学气相沉积法淀积反射率小于 10^{-4} 的 1310 nm 半导体激光器增透膜技术。

2 膜系设计

最简单的增透膜为单层 $\lambda_0/4$ 介质光学膜(λ_0 为设计的中心波长), 膜的折射率 $n =$

$(n_s n_0)^{1/2}$, 其中, n_s 为衬底的折射率, n_0 为空气的折射率。例如, 1310 nm 半导体激光器有源区的等效折射率 n_s 为 3.520, 则使 1310 nm 处反射率为 0 的单层 SiO_xN_y 增透膜的折射率应为 1.876。

另一种较常用的增透膜系为 ABA 结构, 利用已知高、低两种折射率膜层材料, 等效出所需的折射率值, 其等效折射率的计算公式为^[4]:

$$n = \left[\frac{n_A^2 [\sin 2\delta_A \cos \delta_B + \frac{1}{2} (\frac{n_A}{n_B} + \frac{n_B}{n_A}) \cos 2\delta_A \sin \delta_B - \frac{1}{2} (\frac{n_A}{n_B} - \frac{n_B}{n_A}) \sin \delta_B]}{\sin 2\delta_A \cos \delta_B + \frac{1}{2} (\frac{n_A}{n_B} + \frac{n_B}{n_A}) \cos 2\delta_A \sin \delta_B + \frac{1}{2} (\frac{n_A}{n_B} - \frac{n_B}{n_A}) \sin \delta_B} \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中, n_A 、 n_B 分别为膜层 A、B 的折射率, δ_A 、 δ_B 分别为与 A、B 膜层光学厚度有关的位相厚度。例如, 用 a·Si、 SiO_2 设计衬底有源区等效折射率 n_s 为 3.520 的超辐射增透膜的膜系结构为 S/0.372L0.205H0.372L/A, 其中 H、L 分别表示光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的 a·Si 和 SiO_2 , S、A 分别表示衬底和空气, 设计的中心波长为 1310 nm。a·Si 和 SiO_2 的折射率分别为 3.006 和 1.470, 膜系的等效折射率为 1.876。该膜系在入射角为 0° 时 1310 nm 处的设计反射率为 0。

3 实 验

以 ABA 结构为例探讨电子回旋共振等离子体化学气相沉积法淀积反射率 $R < 10^{-4}$ 的 1310 nm 半导体激光器增透膜的技术。实验所镀制的膜系为 S/0.372L0.205H0.372L/A, 其中 H 为 a·Si 和 L 为 SiO_2 , 表示的光学厚度均为 3275 nm。在淀积光学膜之前, 用真空设备将电子回旋共振等离子体化学气相沉积设备淀积室的本底真空度抽至 10^{-5} Pa 数量级以下。淀积过程中, SiO_2 介质膜的淀积条件为: 使用 SiH_4 、 O_2 和 N_2 等气体, 微波源功率为 300 W, 磁场电流为 127 A, SiH_4 、 O_2 气体的流量配比为 $Q(\text{SiH}_4) \cdot Q(\text{O}_2) = 1 \cdot 2$, 淀积室温度为 60°C ; a·Si 介质膜的淀积条件为: 使用 SiH_4 和 Ar_2 气体, 微波源功率为 300 W, 磁场电流为 131 A, SiH_4 和 Ar_2 气体的流量配比为 $Q(\text{SiH}_4) \cdot Q(\text{Ar}_2) = 1 \cdot 1$, 淀积室温度为 45°C 。实验过程中的膜厚用 Sycon-200 型石英晶体膜厚监控仪自动控制。

4 结论和讨论

1) 小于 10^{-4} 的反射率值很难用显微分光光度计直接精确测出。理论分析表明: 若腔长为

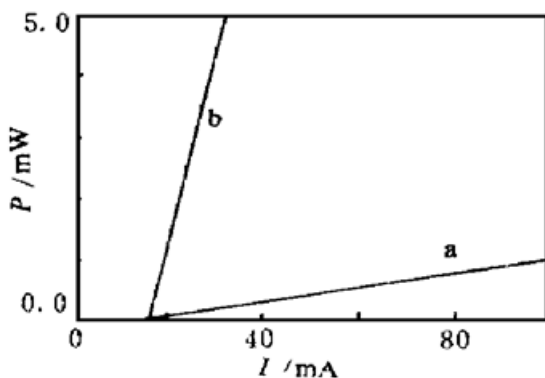


Fig. 1 Variation in power vs current intensity of 1310 nm semiconductor laser device that there are antireflectivity coatings a or not b

600 μm 、条宽为 5 μm 的 1310 nm 半导体激光器两端面镀膜后出现超辐射或发荧光的现象, 则激光器端面增透膜在 1310 nm 处的反射率值小于 10^{-4} , 为此, 分析两端面镀膜后的 1310 nm 半导体激光器的输出特性是一种检验增透膜反射率高低的的有效方法。图 1 为镀膜后的 1310 nm 半导体激光器的输出功率随脉冲电流的变化特性, 图中表明: 该激光器两端面镀膜前阈值电流为 15 mA、输出功率为 0.3 W/A, 镀膜后, 在 140 mA 范围内, 光的输出功率随外加电流变化几乎是线性增加。随着电流的继续增大, 光的输出功率不再增加, 达到饱和, 整个过程不出现激射, 是典型的发荧

光现象。100 mA 电流时的输出光功率为 1 mW。另外, 通过检测该激光器的发光光谱发现: 当通以 100 mA 电流时, 器件的发光光谱带宽为 78 nm, 这进一步证实了该激光器为典型的发光管, 也证明了激光器端面增透膜的反射率小于 10^{-4} 。

2) 实验中是以 ABA 结构为例等效出所需要的折射率的增透膜, 事实上也可以通过改变反应气体的流量配比来实现所需折射率的单层增透膜。电子回旋共振等离子体化学气相淀积法淀积介质膜技术的优点之一在于很容易镀制各种折射率的光学膜, 目前, 本文作者在这种设备上镀制了 a-Si、 SiN_x 、 SiO_xN_y 、 SiO_2 等介质膜, 其折射率在 1.47~3.50 变化, 图 2、图 3 分别为 SiN_x 、 SiO_xN_y 的折射率 n 随相应的反应气体流量比 $Q(\text{N}_2)/Q(\text{SiH}_4)$ 、 $Q(\text{O}_2)/Q(\text{SiH}_4)$ 的变化曲线。这种方法也克服了电子束蒸发法选取膜料的局限性, 为淀积各种特定的光学膜提供了大量可供选择的不同的折射率膜料。本课题中, 也可以选取折射率为 1.876、光学厚度为 3275 nm 的 SiO_xN_y 作为器件的两端面的增透膜, 并达到预期的效果。

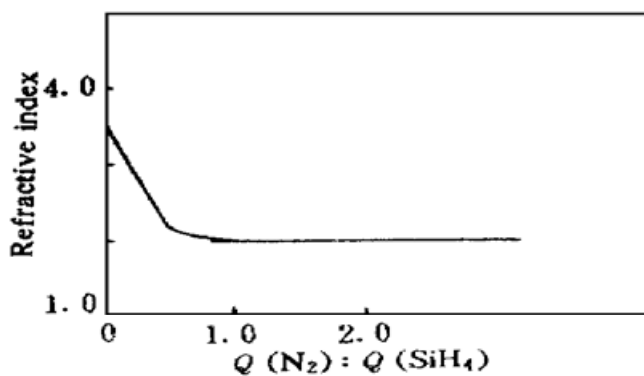


Fig. 2 Variation in SiN_x refractive index as a function of the flow rate ratio of N_2 to SiH_4

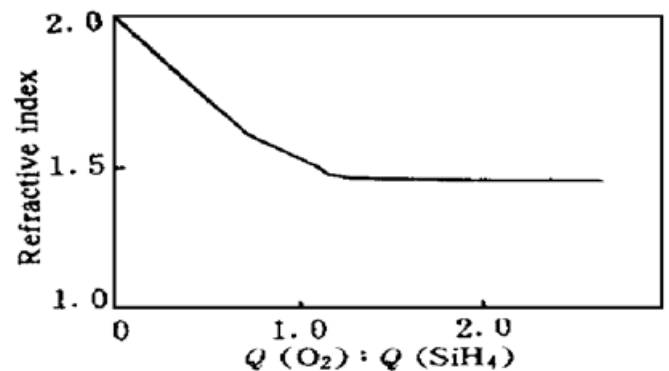


Fig. 3 Variation in SiO_xN_y refractive index as a function of the flow rate ratio of O_2 to SiH_4

3) 该增透膜对膜的致密性有很高的要求, 不然, 置于空气中将会因吸潮等原因而改变膜的折射率和光学厚度, 进而改变其光学性质, 使器件的增透膜失去应有的效果。为分析膜的致密性, 本文作者进行了两种实验: 一是电子回旋共振等离子体化学气相淀积法和等离子体增强化学气相沉积 PECVD 法淀积的介质膜致密性的对比实验; 另一是在 80% 湿度下对用电子回旋共振等离子体化学气相淀积法淀积的介质膜的防潮实验。将用这二种方法淀积的同厚的 SiO_xN_y 膜用 HF 酸缓冲液腐蚀, 结果表明, 等离子体增强化学气相沉积法淀积的介质膜被腐蚀的速率快 2 倍; 用椭偏仪对用电子回旋共振等离子体化学气相淀积法淀积的 SiN_x 、 SiO_xN_y 、 SiO_2 等介质膜防潮实验前后的折射率测量表明, 这些介质膜在一个月的防潮实验中折射率保持不变。由此可见, 用电子回旋共振等离子体化学气相淀积法淀积的介质膜有很好的致密性。另外, 对两端面镀有增透膜的 1310 nm 半导体激光器置于空气中, 45 天后重新测量其光的输出特性, 结果是: 器件仍为发光管, 100 mA 内仍不出现激射; 而与之相对照的电子束蒸发法淀积的该种增透膜在 30 天内器件即由不激射过渡到激射。这进一步说明电子回旋共振等离子体化学气相淀积法淀积的介质膜光学性能稳定, 膜层致密, 防潮性能好。

4) 淀积介质膜的折射率有很好的重复性。大量的重复性实验结果表明: 在设备正常工作的情况下, SiO_2 的折射率为 1.470 ± 0.002 (测量光学波长为 632.8 nm), a-Si 的折射率为 3.006 ± 0.003 (测量光学波长为 1310 nm), 其它介质膜工艺的折射率重复偏差一般也小于 0.003, 远远高于电子束蒸发法淀积介质膜的折射率的重复性, 正因为如此, 使用石英晶体膜厚监控仪监控反射率小于 10^{-4} 的 1310 nm 半导体激光器端面增透膜并得到满意的结果才

成为现实。

5) 计算结果表明: SiO_2 或 a-Si 的膜厚有 1~ 2 nm 的变化, 都有可能使增透膜的反射率高于 10^{-4} , 为此, 实验中的膜厚监控仪必须有很高的精度, 本实验是用石英晶体膜厚监控仪自动监控每层膜的厚度, 绝对误差小于 0.5 nm, 实验结果也证实了对反射率 $R < 10^{-4}$ 的增透膜的膜厚监控是成功的。

6) 本文讨论的是电子回旋共振等离子体化学气相淀积法淀积反射率 $R < 10^{-4}$ 的 1310 nm 半导体激光器端面增透膜的技术, 事实上, 本文作者用这种方法同样镀制了其它波段的低反射半导体器件增透膜。可以预见, 其它衬底的超低反射率的增透膜也可以用这种方法镀制。

本文的许多工作得到中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心陈良惠研究员、李玉璋研究员、王丽明工程师的关心和帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Steven Dzioba, R. Rousina. Dielectric thin film deposition by electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition for optoelectronics. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1994, **B12**(1) : 433~ 440
- [2] Y. Manabe, T. Mitsuyu. Silicon nitride thin films prepared by the electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition method. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(4) : 2475~ 2480
- [3] Takashi Inukai. Optical characteristics of amorphous silicon nitride thin films prepared by electron cyclotron resonance plasma chemical vapor deposition. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(5A) : 2593~ 2598
- [4] 林永昌, 卢维强编著. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990. 103~ 107

Antireflection Coatings of 1310 nm Opto-Electronic Devices with $R < 10^{-4}$

Tan Manqing Mao Dongsheng Wang Zhongming

(National Engineering Research Center of Opto-Electronic Devices, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

(Received 27 September 1997; revised 4 March 1998)

Abstract The dielectric thin films deposited on compound semiconductors devices by electron cyclotron resonance (ECR) plasma chemical vapor deposition (CVD) are characterized. The method to deposit antireflectivity coatings on 1310 nm semiconductor lasers with reflectivity less than 10^{-4} and its advantage are discussed.

Key word method of ECR plasma CVD, laser devices of semiconductor, antireflection coating, reflectivity.