

文章编号: 1001-4322(1999)05-0565-04

极高反射率氧碘激光腔镜研制

黄 伟, 张云洞

(中国科学院光电技术研究所, 成都双流 350 信箱, 610209)

摘 要: 报道了反射率大于 99.9% 的氧碘激光腔镜的研制工艺及其反射率测试结果。对该工艺制作的样品进行了激光损伤实验, 实验结果表明能够满足目前 COIL 激光器的阈值要求。

关键词: COIL 激光器; 薄膜; 高反射率; 损伤阈值

中图分类号: TN248.5 **文献标识码:** A

随着激光器的功率和能量提高, 对激光器腔镜反射膜的反射率要求也越来越高。腔镜反射率的提高不仅可以提高激光器的输出功率, 而且还可以减小腔镜在激光辐照时的热畸变, 从而改善激光光束的质量。美国、法国等许多发达国家投入了大量人力、物力研究和探索获得高反射率膜层的途径, 目前国际上反射率最高可达到 99.9998%, 是用离子束溅射技术得到的^[1]。报导在波长为 3.8 μm 的氟化氘 (DF) 激光系统中, 用热蒸发技术镀制成功反射率大于 99.99% 的反射镜^[2]。目前, 国内有些单位虽然在某一波长上腔镜反射率已经达到三个九, 但工艺和反射率并不是很稳定, 其反射率测量也只是单点测量, 并不能代表整个镜面的反射率。我们研制的化学氧碘激光 (COIL) 腔镜反射率在三个九以上, 测量是整个镜面沿径向方向上的四个点的平均值, 这种测量方法能够较准确地反应整个镜面的反射率。

1 高反射率腔镜研制

COIL 腔镜对光谱性能的要求如下: 1.315 μm 和 0.6328 μm 双波长反射, 其中 $R_{1.315\mu\text{m}} \geq 99.9\%$ 、 $R_{0.6328\mu\text{m}} \geq 95\%$, 激光损伤阈值在 20kW/cm² 以上。为了达到上述指标, 我们在膜系设计、材料选取及处理、镀膜工艺、镀膜参数和镀后热处理方面做了大量的工作。整个腔镜镀制工艺在成都南光实业股份有限公司生产的 H4411- I 型箱式镀膜机 (配德国莱宝公司的电子枪和高压电源) 上完成的。

1.1 膜系设计

COIL 腔镜采用全介质膜系, 由厚度分别为四分之一波长的高、低折射率两种材料交替迭加而成。在不考虑损耗的情况下, 在空气中光线垂直入射时, 中心波长 λ_0 处的反射率, 也即极大值反射率为

$$R_{\max} = \left[\frac{1 - (n_H/n_L)^{2s} (n_H^2/n_g)}{1 + (n_H/n_L)^{2s} (n_H^2/n_g)} \right]^2 \quad (1)$$

式中 n_H 、 n_L 分别表示高、低折射率膜层的折射率, n_g 为基片折射率, s 是膜堆中高低折射率膜层周期的重复次数。

• 国家 863 激光技术领域资助课题

1999 年 6 月 20 日收到原稿, 1999 年 8 月 20 日收到修改稿。第五届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文
黄伟, 男, 1967 年 4 月出生, 硕士, 助理研究员

从理论上讲,这样一组全介质膜堆在膜层层数足够多时,可望得到足够接近 100% 的反射率。但实际上膜层的层数不能无限的增加,最高可达到的反射率要受到膜层吸收和散射损耗的限制。如果仅考虑膜层吸收,那么膜系的反射率极限为

$$R_{\text{lim}} = 1 - \frac{2\pi n_0(k_H + k_L)}{n_H^2 - n_L^2} \quad (2)$$

式中 k_H 、 k_L 分别为高、低折射率材料的消光系数。

COIL 腔镜的膜系结构为: sub/(0.48L 0.48H)₅(LH)₁₄/Air, 其中 H、L 分别代表膜厚为 $\lambda_0/4$ 的高、低折射率膜层,它们分别为 Ta₂O₅ 和 SiO₂。图 1 为该膜系和反射率理论光谱曲线。

Ta₂O₅ 折射率和消光系数为 2.05 和 2×10^{-5} , SiO₂ 折射率和消光系数为 1.46 和 2×10^{-6} 。由公式(1)可以得到该膜系在不考虑吸收和散射损耗时的最大反射率为 99.975%, 在上述消光系数的情况下,用这两种材料制备的反射膜所能达到的反射率极大值为 99.9934%。

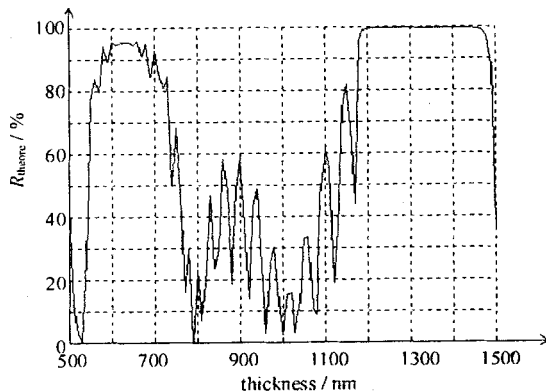


Fig. 1 Theoretical spectral curve of resonator of COIL laser

图 1 COIL 腔镜反射率的理论光谱曲线

1.2 镀膜材料的选取

选用 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 分别作高、低折射率膜料, SiO₂ 这种材料在使用波段消光系数足够小,膜层呈无定形结构,具有较高的激光损伤阈值,是一种理想的低折射率膜料。对于高折射率材料可供选择的有 HfO₂、TiO₂、Ta₂O₅ 及 ZrO₂ 等, HfO₂ 虽然具有较高的激光损伤阈值,但如果膜层太厚,镀制在石英和玻璃基片上会出现裂纹,且蒸发速率难控制,膜的表面散射较大; TiO₂ 虽然容易蒸发,蒸发速率比较好控制,但因其消光系数较大、激光损伤阈值低等原因,最后选择了 Ta₂O₅ 作高折射率材料。结果表明这种膜散射损耗较小,与 SiO₂ 膜结合良好,在硅、石英基片上附着牢固,反射率能够稳定地达到三个九以上。Ta₂O₅ 选用灰色片状膜料, SiO₂ 选用小颗粒状材料,这种材料的蒸发状态稳定均匀。

1.3 镀制工艺

Ta₂O₅ 和 SiO₂ 采用电子束反应蒸发,在蒸镀过程中充高纯氧(99.99%),对 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 分别充氧压在 2.0×10^{-2} Pa 和 1.4×10^{-2} Pa 左右。为得到低散射的膜层采用慢速蒸发,并用绘图仪实时监视蒸发状态。

膜层厚度控制采用透射式光控极值法,用短波控长波。由于光强信号用光电倍增管探测,信号响应的范围为可见光区,要控制 1315nm 波长,我们采用两倍极值法控制。为了减小膜层吸收,元件镀膜后都进行了热处理。

2 测试结果

为了进一步提高反射率和损伤阈值,同时确保 COIL 腔镜的安全运行,我们于 98 年 5 月在大连化物所对一些样品进行了损伤实验,实验结果见表 1。

表1 COIL激光反射镜损伤实验结果

Table 1 Experimental results of damage of resonator mirror of COIL laser

test No.	test No.	substrate	incident angle	material	reflectivity $\lambda=1315\text{nm}$	power /kW·cm ⁻²	damage condition
980512	605	Si	45°	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	99.93	15.7	with
980514	606	Si	45°	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	99.97	23.8	with
980401	607	Si	0°	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	99.93	22.9	without
980401	611	Si	0°	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	99.86	124.0	with
980403	613	Si	0°	Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	99.94	58.6	without
980522	612	Si	0°	HfO ₂ /SiO ₂	99.97	66.6	without
980516	613	Si	45°	HfO ₂ /SiO ₂	99.94	34.8	without

反射率测量用我们与国防科大二系合作研制的高反射率/透射率测量仪测量,精度可达到万分之五左右。同时我们的结果与大化所的结果进行了比对,两者符合较好,而大化所是用测量激光谐振腔的损耗的方法来测量反射率的,是目前国际上最流行的方法,能够测出几百万分之一损耗^[2,3]。表2是测量结果。

表2 COIL腔镜反射率测量结果

Table 2 Tested results of reflectivity of resonator mirror of COIL laser

sample No.	roughness /nm	1.315 μm R/%		0.6328 μm R/%	coating date
		ICP	ours		
A3	0.57	99.932	99.93	95.38	980403
E2	0.46	99.934	99.93	95.38	980403
E1	0.64	99.939	99.93	96.21	980407
C1	0.55	99.653	99.93	96.21	980407
B3	0.47	99.934	99.93	96.21	980407
B2	0.45	99.947	99.93	96.21	980407
F2	0.52	99.942	99.94	97.10	980409
A2	0.53	99.946	99.94	97.10	980409
C2	0.41	99.936	99.92	95.64	980316
F1	0.49	99.938	99.92	95.64	980316
A4	0.52	99.957	99.94	97.00	980714
B4	0.44	99.925	99.94	97.00	980714
C4	0.41	99.932	99.94	97.00	980714
A5	0.47	99.926	99.94	97.00	980714
C5	0.48	99.934	no measured	no measured	980717
D5	0.43	99.928	no measured	no measured	980717
D4	0.43	99.938	no measured	no measured	980717
E4	0.46	99.963	no measured	no measured	980717

从表1中可看出0°入射的反射镜,损伤阈值在60kW/cm²以上、低于124kW/cm²;45°入射的反射镜,镀膜材料用HfO₂/SiO₂组合,损伤阈值在35kW/cm²以上。

从表2可以看到我们一共镀制了十八块腔镜,其中十七块的反射率在99.9%以上,其中最高的为99.963%,也可以说用这套镀制工艺和参数可以比较稳定地做到三个九以上的反射率。

3 结 论

反射镜反射率受基板表面粗糙度影响,要达到三个九以上的反射率要求基板表面均方根粗糙度在 0.5nm 左右,要达到更高的反射率对基板的粗糙度要求更高。在激光阈值实验中发现 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 组合的损伤阈值不算太高,这可能是由于 Ta_2O_5 的吸收造成的。今后还需在薄膜元件的后处理上作较深入的研究,以便进一步减小膜层吸收,提高腔镜的激光损伤阈值。

参 考 文 献

- 1 Flory F R. Thin films for optical systems. New York, Marcel Dekker, Inc. 1995, 140~141
- 2 Marrujo A R, Lieto C, et al. Deuterium-Fluoride uncooled optics at HELSTF. *Critical Reviews*, **CR67**:373~392
- 3 Uehara N, Ueda K. Accurate measurement of ultralow loss in a high-finesse Fabry-Perot interferometer using the frequency response functions. *Appl Phys*, 1995, **B61**(1):9~15
- 4 Macleod H A. Thin-film optical filters. New York:Macmillan Company, 1986

MANUFACTURE OF THE RESONATOR MIRROR OF COIL WITH VERY HIGH REFLECTIVITY

HUANG Wei, ZHANG Yun-dong

Institute of Optics & Electronics, Academia Sinica, P. O. Box 350, Shuangliu, Chengdu, 610209

ABSTRACT: The manufacture technique of resonator mirrors of COIL with reflectivity higher than 99.9% and the tested results of the reflectivity have been reported in this paper. Furthermore, the experiment for laser damage of the samples manufactured by this technique has been done, the experimental results show that the resonator mirrors manufactured by our technique can fulfill the threshold requirement of COIL.

KEY WORDS: COIL; film; high reflectivity; damage threshold