

文章编号: 0258-7025(2004)02-0153-04

高损伤阈值氟化氙腔镜研制

黄伟^{1,2}, 张云洞², 蔡邦维¹

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 中国科学院光电技术研究所, 四川 双流 610209)

摘要 报道了氟化氙(DF)激光器腔镜的膜系设计、材料选取、制备工艺及其损伤阈值和热畸变测试结果, 实验结果表明, 镜面在 21 kW/cm² 功率密度下的热畸变为 0.3λ 左右(λ = 632.8 nm), 腔镜的损伤阈值大于 40 kW/cm²。

关键词 激光技术; DF 激光器; 薄膜; 高反射率; 高损伤阈值; 热畸变

中图分类号 TN 243.0484 文献标识码 A

Study of Cavity Mirrors of DF Chemical Laser with High Damage Threshold

HUANG Wei^{1,2}, ZHANG Yun-dong², CAI Bang-wei¹

(¹ College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China
² Institute of Optics & Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Shuangliu, Sichuan 610209, China)

Abstract In this paper, the design of coating system, choose of materials, technology of fabrication, as well as the experimental results for the damage threshold and thermal deformation of the cavity mirrors of DF laser are reported. The experimental results show that the thermal deformation of the cavity mirrors of DF laser is about 0.3λ (λ = 632.8 nm) under the power density of 21 kW/cm², and the damage threshold of the cavity mirrors of DF laser is higher than 40 kW/cm².

Key words laser technique; DF chemical laser; thin film; high reflectivity; high damage threshold

1 引言

光学薄膜是激光系统中的重要组成部分, 对于高功率激光系统来说, 光学薄膜相对于其他元件具有较低的抗激光损伤阈值, 它是限制激光器功率进一步提高的瓶颈, 是激光系统设计的重要依据和最大限制。

氟化氙(DF)化学激光器自从 20 世纪 60 年代末演示成功以来, 发展非常迅速, 输出功率也越来越高。随着激光功率的提高, 对腔镜反射膜的反射率要求也越来越高。反射率的提高不仅可以提高激光器的输出功率和腔镜的损伤阈值, 而且还可以减小腔镜的热畸变, 改善激光光束的质量。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]。Marrujo 等研制成了 DF 激光系统中超低损耗薄膜, 并报道了用热蒸发技术镀制成功反

射率大于 99.99% 的反射膜^[2]。

本文首先对氟化氙激光腔镜反射膜的膜系进行优化设计, 在此基础上, 选择合适的镀膜材料制备了氟化氙激光腔镜反射膜, 并对制备的样品进行了激光损伤和热畸变实验。

2 膜系设计及薄膜材料选择

腔镜反射膜采用全介质膜系, 由厚度分别为四分之一波长的高、低折射率两种材料交替叠加而成。在不考虑薄膜损耗的情况下, 当空气中光线垂直入射时, 中心波长处的最大反射率为^[3]

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

式中 n_H , n_L 分别表示高、低折射率膜层的折射率, n_g 为基片的折射率, m 为膜堆中高、低折射率膜层周期

收稿日期 2003-02-13; 收到修改稿日期 2003-04-28

作者简介: 黄伟(1967.4—)男, 重庆市万州人, 中国科学院光电技术研究所副研究员, 硕士, 主要从事光学薄膜理论及制备技术。E-mail: huangwei@sohu.com

的重复次数。

当层数足够多时,即

$$\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2m} \cdot \frac{n_H^2}{n_g} \gg 1 \quad (2)$$

(1)式可简化为

$$R \approx 1 - 4 \cdot \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2m} \cdot \frac{n_g}{n_H^2} \quad (3)$$

从理论上讲,当全介质膜堆的膜层层数足够多时,可望得到接近 100% 的反射率。然而,在实际工作中,膜层的层数不可能无限地增加,且可达到的最高反射率还要受到膜层吸收和散射损耗的限制。当膜系达到一定层数后,再继续增加层数不但不能提高其反射率,相反由于吸收、散射损失的增加,反而会使反射率下降。因此,膜系中的吸收和散射损耗限制了介质全反射膜的最大层数。如果仅考虑膜层吸收,则 $\lambda/4$ 膜系的反射率极限为^[4]

$$R_{\max} = 1 - \frac{2\pi n_0 \cdot (k_H + k_L)}{n_H^2 - n_L^2} \quad (4)$$

式中 k_H 、 k_L 分别为高、低折射率材料的消光系数。

制备超高反射率的反射镜,首先要考虑高、低折射率膜料,因为欲达到某个已确定的反射率值和一定的带宽主要依赖于两种材料的折射率之比,希望

选择折射率差值较大的两种膜料,可以用较少的层数便可以达到所要求的反射率值。膜料最重要的性质之一就是对工作环境的耐久性,一般来说,膜料必须具备良好的附着性能、抗潮湿、能经受一定的腐蚀。对高功率激光要得到非常高的反射率必须要求介质涂层的吸收、散射损耗非常低,任何损耗都会降低反射率。因此,相匹配的镀膜材料是最为重要的参量。在 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 光谱区满足要求的红外材料有许多,文献[5]详细研究了各种透明材料在 $3.8 \mu\text{m}$ 波长的吸收情况。在我们的 DF 激光系统中,高折射率材料主要选择 ZnS 和 ZnSe,低折射率材料为 YbF_3 ,中间折射率材料选择 PbF_2 ,其光学特性参量如表 1 所示。

将表 1 所示的 ZnS/ YbF_3 和 ZnSe/ YbF_3 结构材料特性参量分别代入(3)式和(4)式,经比较即可得到相应结构的最高理论反射率和最佳膜对数。具体来说,ZnS/ YbF_3 结构的最高理论反射率为 $R_{\max} = 99.988\%$,最佳膜对数为 $m = 11$ 对,而 ZnSe/ YbF_3 结构的最高理论反射率为 $R_{\max} = 99.992\%$,最佳膜对数为 $m = 11$ 对。

表 1 薄膜材料的光学特性

Table 1 Optical properties of thin film materials

	ZnS	ZnSe	YbF_3	PbF_2
Refractive index (n)	2.15	2.3	1.36	1.74
Extinction coefficient (k)	2.25×10^{-5}	1.5×10^{-5}	3×10^{-5}	6×10^{-6}

我们设计的 DF 腔镜选用 ZnS 和 YbF_3 分别作高、低折射率膜料。其中, YbF_3 材料在使用波段消光系数小,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。目前,可供选择的高折射率材料有 ZnS、ZnSe 等。虽然 ZnSe 具有较低的消光系数和高的激光损伤阈值,但与 YbF_3 匹配不太好,如果膜层太厚则会发生龟裂、脱膜等现象,膜的表面散射也较大。众所周知,硫化锌作为光学薄膜材料有许多优点,折射率高(2.35)和宽的透过光谱范围($0.4 \sim 13 \mu\text{m}$)、好的环境稳定性和沉积速率快(电阻蒸发源)等特点,折射率特性接近块材^[6]。它通常表现为具有压应力,与 YbF_3 膜结合良好,实验结果表明在硅、石英基片上附着牢固,反射率能够做得较高。

在确定了薄膜材料以后,经优化设计得到的 DF

腔镜的膜系结构为:Sub/(HL)⁵H(6L6H)¹¹/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 ZnS 和 YbF_3 ,波长 $\lambda_0 = 633 \text{ nm}$,图 1 为该膜系的反射率理论计算曲线。

3 镀制工艺及实验结果

氟化氙腔镜镀制在 H4411-II 型高真空箱式膜镀膜机上完成,该设备配有德国莱宝的电子枪和高压电源及 OMS-3000 光学监控系统。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,要控制中心波长在 3800 nm 的膜层,一般采用 5 倍极值法控制,同时控制精度也提高了 5 倍。膜层厚度控制采用反射式光控极值法,用短波控长波。沉积过程真空度保持在 $9 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 范围。在中红外波段,基片材料选用 Si,镜面表面均方根粗糙

度一般在 0.5 nm 左右 ,面形在 $\lambda/10$, $\lambda = 632.8$ nm。基片在镀膜之前都经过严格的清洗流程和检

查 ,蒸发速率 YbF_3 控制在 0.5 nm/s , ZnS 控制在 1

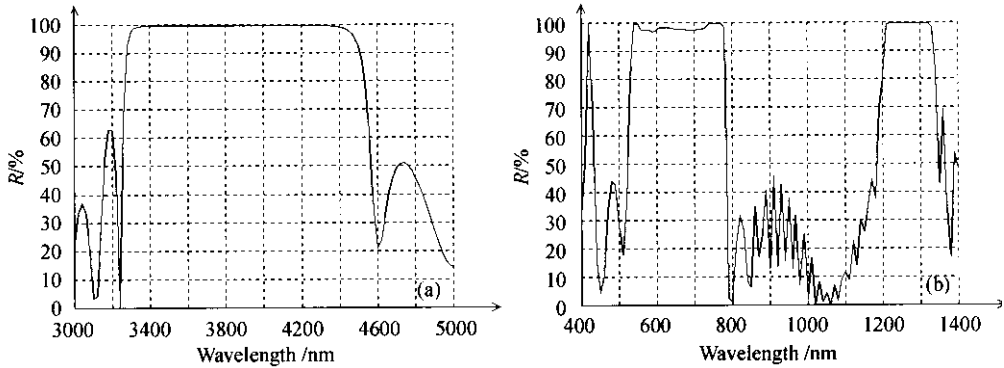


图 1 DF 腔镜的膜系反射率理论计算曲线

(a) 中红外波段 (b) 可见及近红外波段

Fig. 1 Theoretical calculation curve of the reflectivity of the cavity mirrors of DF laser

(a) in the range of mid-infrared wavelengths ;(b) in the range of visible and near-infrared wavelengths

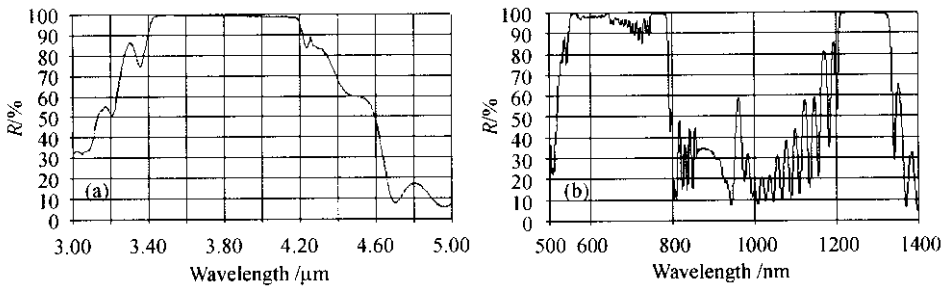


图 2 DF 腔镜的膜系反射率测试曲线

(a) 中红外波段 (b) 可见及近红外波段

Fig. 2 Tested curve of the reflectivity of the cavity mirrors of DF laser

(a) in the range of mid-infrared wavelengths ;(b) in the range of visible and near-infrared wavelengths

nm/s 左右。

可见、近红外波段的测试仪器为 Lambda-900 型紫外-可见-近红外分光光度计 ,反射率测量用该仪器自带绝对反射率测量附件 ,中红外波段为 Paragon-1000 型红外傅里叶变换光度计。反射率测试曲线如图 2 所示 ,比较图 1 和图 2 可以看到 ,实验测试曲线与理论计算曲线符合得相当好。进一步由图 2 可知 ,在 DF 激光波长 3800 nm 的 3 倍频(1267 nm)处 ,绝对反射率测量结果为 99.816% ,在 5 倍频(760 nm)处 ,绝对反射率为 99.915% ,在 He-Ne 激光波长 632.8 nm 处 ,绝对反射率为 99.298%。由于薄膜材料选用的是红外材料 ,在中红外波段它的消光系数比近红外更小 ,可以推断在 3800 nm 处的吸收、散射应更小 ,所以它的反射率应该比 3 倍频处的反射率更高 ,即大于 99.816%。但是否大于 99.9% ,目前还没有测试结果。

为了检验 DF 腔镜的质量 ,测试了它的激光损伤阈值和热畸变情况。图 3 为实验光路示意图。

图 3 中 1 为 DF 激光器 2 为 45° 反射镜 3 是焦距为 10 m 的反射聚焦镜 4 是焦距为 1 m 的 CaF_2

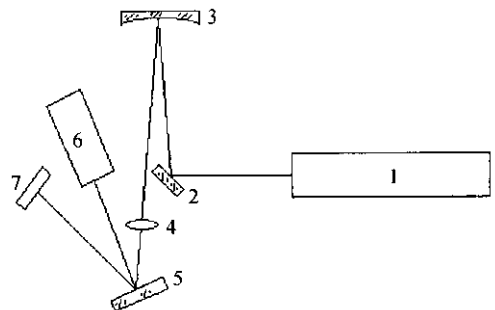


图 3 损伤实验和热畸变实验光路示意图

Fig. 3 Experimental scheme of damage threshold and thermal deformation

4 损伤及热畸变实验

透镜 5 为实验样品 6 为哈特曼波前测量仪 7 为有机玻璃板。DF 激光器输出的激光经过一面 45° 反射镜反射到反射聚焦镜后通过 CaF_2 透镜再次聚焦到实验样品上, 实验样品吸收激光能量而发生热变形, 它的热畸变量由哈特曼传感器探测得到。另外,

实验样品在每次激光辐照后在显微镜下观察是否有器质性破坏, 从而判断损伤是否发生, 并经多次实验得到反射镜的损伤阈值。实验样品放在焦点上而未损伤。实验结果见表 2。

表 2 DF 反射镜热畸变实验结果

Table 2 Experimental results of thermal deformation of cavity mirrors of DF laser

Test No.	Sample No.	Power density $/\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	Thermal deformation $P-V$ value ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)	Damage situation
1	020709	21	0.305	No damage
2	020712	21	0.311	No damage
3	020813	21	0.185	No damage
4	020815	21	0.192	No damage
5	020820	21	0.532	No damage
6	020827	21	0.317	No damage
7	020708	21	0.164	No damage

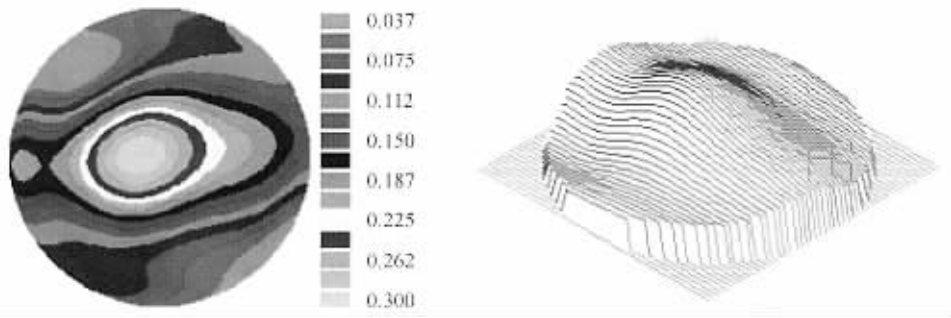


图 4 典型的热畸变测试结果

Fig. 4 Typical tested results of thermal deformation

图 4 为一幅典型的 DF 反射镜热畸变测试结果, 从图中可以得到反射镜最大热畸变量 ($P-V$ 值) 为 0.3λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

由于受实验条件限制, 稳定腔输出的光斑不能聚焦得很小, 但所有实验样品都在功率密度为 $40 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 下辐照过, 没有观测到损伤现象。

5 结 论

通过对 DF 激光器腔镜膜系的优化设计、材料的合理选取以及采用特定的制备工艺研制出了 DF 激光器腔镜, 对腔镜的损伤阈值和热畸变进行了测试。实验结果表明, 研制出的腔镜反射率在三倍频处的绝对反射率为 99.816% , 在反射板中心波长处 (3800 nm) 的反射率应更高, 实验样品在 $21 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 功率密度下的热畸变为 0.3λ 左右, 最小的热变形 $P-V$ 值为 0.164λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 其损伤阈值大

于 $40 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。

参 考 文 献

- 1 Francois R. Flory, Marcel Dekker. Thin Films for Optical Systems [M]. New York : Marcel Dekker, Inc. , 1995. 140 ~ 141
- 2 Antonio R. Marrujo, Christopher Lieto, Pat Pomphrey *et al.* . Deuterium-Fluoride uncooled optics at HELSTF [C]. *Critical Reviews* , 1997 , **CR67** 373 ~ 392
- 3 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principle of Optical Thin Films [M]. Beijing : National Defense Industry Press , 1990. 239
林永昌, 卢微强. 光学薄膜原理 [M]. 北京 : 国防工业出版社 , 1990. 239
- 4 Yan Yixin, Lin Honghai. Technology of Thin Films [M]. Beijing : Weapon Industry Press , 1994. 22
严一心, 林鸿海. 薄膜技术 [M]. 北京 : 兵器工业出版社 , 1994. 22
- 5 J. A. Harrington, J. E. Rudisill, M. Braunstein. Thin-film $2.8 \mu\text{m}$ and $3.8 \mu\text{m}$ absorption in single-layer film [J]. *Appl. Opt.* , 1978 , **17**(17) 2798 ~ 2800
- 6 M. Debenham. Refractive indices of zinc sulfide in the $0.405 \sim 13 \mu\text{m}$ wavelength range [J]. *Appl. Opt.* , 1984 , **23**(14) 2238 ~ 2239