

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0483-03

## 高损伤阈值 $\text{CaF}_2$ 窗口红外宽带增透膜研制

黄伟<sup>1,2</sup> 张云洞<sup>2</sup> 蔡邦维<sup>1</sup>

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

**提要** 采用  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  五层膜系结构镀制了  $\text{CaF}_2$  窗口在  $3.4\sim 4.2\ \mu\text{m}$  波长范围的红外宽带增透膜, 光谱测试结果表明平均透过率在 99% 以上, 该膜层能承受 200 kW 的激光功率输出。

**关键词** DF 化学激光器,  $\text{CaF}_2$  窗口, 宽带增透膜, 高损伤阈值

**中图分类号** O484.1 **文献标识码** A

### Manufacture of the Wide-band Infrared Antireflective Coatings on $\text{CaF}_2$ Window with High Damage Threshold

HUANG Wei<sup>1,2</sup> ZHANG Yun-dong<sup>2</sup> CAI Bang-wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064)  
(<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Shuangliu 610209)

**Abstract** By using  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  five-layer coatings, wide-band infrared antireflective coatings on  $\text{CaF}_2$  window in the range of  $3.4\sim 4.2\ \mu\text{m}$  has been fabricated. The tested spectral results have shown that the average transmittance is above 99%. The wide-band infrared antireflective coatings on  $\text{CaF}_2$  window can endure the output laser with 200 kW.

**Key words** DF chemical laser,  $\text{CaF}_2$  window, wide-band infrared antireflective film, high damage threshold

## 1 引言

高功率 DF 化学激光器常用  $\text{CaF}_2$  作窗口, 通常需要在  $\text{CaF}_2$  窗口上镀制高损伤阈值宽带增透膜, 否则将会有 8% 左右的能量返回到激光腔内, 这不仅会降低激光器的输出功率, 而且还可能引起腔内光学元件的损伤。除此之外, 如果  $\text{CaF}_2$  窗口不镀增透膜, 将会使其长期暴露在大气中而被腐蚀, 从而大大地降低  $\text{CaF}_2$  窗口的光学性能。

本文详细讨论了高功率 DF 化学激光器所用高损伤阈值  $\text{CaF}_2$  窗口红外宽带增透膜的镀膜材料选取, 多层减反射膜的优化设计与制备技术以及元件性能的测试结果。在分析比较多种镀膜材料性能的基础上, 选择  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  两种材料的组合, 用光控极值法控制膜层厚度, 采用电子束沉积技术得到了在  $3.4\sim 4.2\ \mu\text{m}$  的波长范围内平均透过率大于 99% 的宽带增透膜, 该膜层能承受 200 kW 的激光功率输出, 且具有很好的机械特性, 膜层附着牢固不脱落。

## 2 膜系设计及薄膜材料选择

对于单层增透膜, 达到零反射的条件是: 膜层的光学厚度为四分之一波长, 其折射率为入射介质和基片折射率乘积的平方根<sup>[1]</sup>, 即

$$n = \sqrt{n_0 n_s} \quad (1)$$

其中,  $n_0$  为入射介质折射率,  $n_s$  为基底材料折射率,  $n$  为镀膜材料折射率。

单层膜由于折射率和厚度不能随意改变, 因此只能使某一波长的反射率为零, 或使一有限波段内的反射率较低, 其它地方的反射率仍然很高。为了在较宽的波段范围内实现增透, 必须采用两层膜或多层膜。

为了获得高损伤阈值、低吸收的增透膜, 镀膜材料必须选取那些消光系数小, 损伤阈值高的镀膜材料。在  $2\sim 6\ \mu\text{m}$  光谱区满足要求的红外材料有许多, J. A. Harrington<sup>[2]</sup> 详细研究了各种透明材料在  $3.8\ \mu\text{m}$  波长的吸收情况, 测量值如图 1 所示。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<sub>3</sub>,中间折射率材料选择 PbF<sub>2</sub>,他们的光学参数如表 1 所示。

表 1 薄膜材料光学特性

Table 1 Optical properties of coating materials

Optical parameters	Refringence <i>n</i>	Extinction coefficient
ZnS	2.15	$2.25 \times 10^{-5}$
ZnSe	2.30	$1.5 \times 10^{-5}$
YbF <sub>3</sub>	1.36	$3.0 \times 10^{-5}$
PbF <sub>2</sub>	1.74	$6.0 \times 10^{-6}$

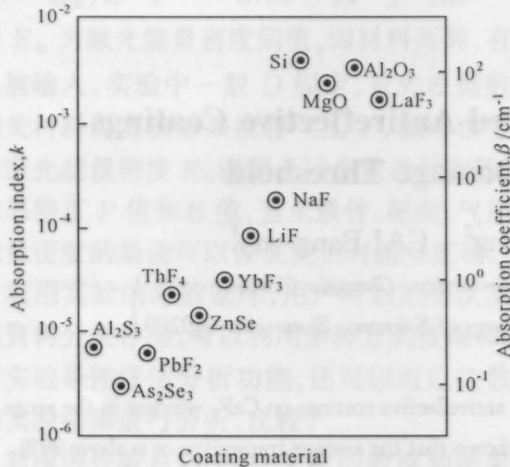


图 1 CaF<sub>2</sub> 基片上单层薄膜 3.8 μm 吸收测试结果

Fig. 1 The tested result of 3.8 μm absorption in single-layer thin film on CaF<sub>2</sub> substrates

在我们以前的工作中<sup>[3]</sup>,CaF<sub>2</sub> 窗口宽带增透膜膜系采用两种材料、五层膜系结构,具体结构为

Sub/0.23H0.282L1.836H0.702L0.101H/Air,

其中 H、L 为中心波长为 3.8 μm 的四分之一波长膜层,前面的数字是倍数。但是该膜层在使用一段时间发生龟裂、起皮和脱膜现象,分析原因认为是膜层应力不匹配造成的。特别是膜系结构中的第三层高折射率材料,膜层厚度太厚,与后面的低折射率材料厚度相差太大,造成这两层膜之间的应力不匹配。我们镀制的 DF 腔镜,膜层厚度更厚,但没有发现脱膜现象,原因在于高低折射率材料膜层厚度相差不大,两者之间的应力比较匹配。另外,ZnSe 材料的应力情况比较复杂,它与基片温度、膜层厚度密切相关。为了克服上述缺点,我们在新的膜系设计时,高折射率材料用 ZnS,并限定了相邻两层膜的厚度要一致和最外层膜必须是高折射率材料膜层的约束条件,经过优化设计,得到如下膜系结构:

Sub/0.362H0.362L0.724H0.724L0.145H/Air,

它的理论曲线如图 2 所示。其中曲线 1 表示原设计膜系的理论曲线,曲线 2 为改进后的理论曲线,两者的光谱宽度和透过率都相差不大,但后者膜层附着好、制备工艺简单。

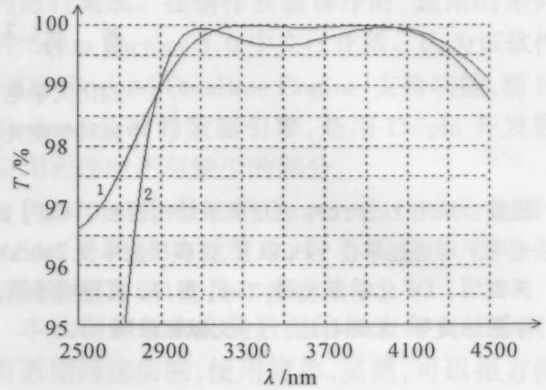


图 2 CaF<sub>2</sub> 基片五层增透膜透过率理论计算曲线

Fig. 2 Calculated transmittance of five-layer antireflective coatings

### 3 制备工艺及测试结果

CaF<sub>2</sub> 窗口增透膜的制备是在国产南光股份有限公司生产的 H4411-II 高真空箱式镀膜机上进行的。镀膜机极限真空度可到  $4 \times 10^{-3}$  Pa,并配德国莱宝公司进口的 ESV14D/Q 型电子枪和 HV10.2 型高压电源,镀膜材料用电子束加热方式蒸发,YbF<sub>3</sub>、ZnS 蒸发速率分别为 0.2 nm/s 和 1 nm/s。基片烘烤采用碘钨灯下加热方式,加热温度用温度控制仪自动控制在 120 ℃,膜层厚度采用光学透射式极值法控制,膜厚仪为南光产的 9704 型膜厚仪,控制波长根据材料色散特性和镀膜机的实际蒸气分布情况得到,具体控制参数见表 2。

表 2 CaF<sub>2</sub> 增透膜膜层控制参数

Table 2 Controlled parameters of antireflective coatings on CaF<sub>2</sub> windows

No.	Films	Controlled wavelength /nm	Times of λ/4 films
1#	0.362H	577	3
	0.362L		3
2#	0.724H	620	5
	0.724L		5
	0.145H		1

实验样品的透过率曲线在美国 PE 公司生产的 PARAGON-1000 型傅里叶红外光度计上测试,其光谱曲线见图 3,图中横坐标表示波长,纵坐标表示透过率。从图 3 可知,在 3.4~4.2 μm 的光谱范围内平

均透过率在 99% 以上, 峰值透过率接近 100%, 与理论曲线符合很好, 说明制备工艺和膜厚控制方法正确。

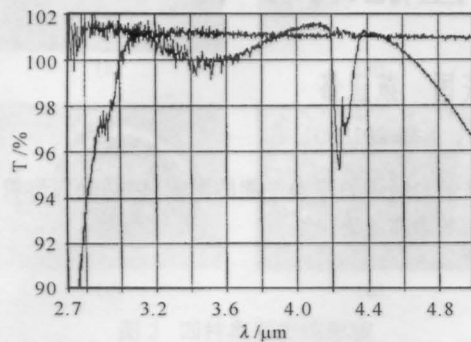


图3  $\text{CaF}_2$  增透膜的透过率测试曲线

Fig.3 Tested transmittance of antireflection coatings on  $\text{CaF}_2$  windows

## 4 总 结

用五层膜  $\text{ZnS}/\text{YbF}_3$  结构满足了系统对光谱带宽和透过率的要求, 并且已成功地运用于DF激光

系统中的  $\phi 200$  mm 直径的  $\text{CaF}_2$  窗口和不同口径各种分光比的输出镜背面的增透膜制备, 这些镜子都经受住了 200 kW 激光功率输出而没有损伤。根据镀膜材料的色散特性确定监控波长, 采用极值法控制膜层厚度的方法是可行的, 测试结果和理论值符合得相当好已说明了这一点。需要指出的是,  $\text{YbF}_3$  材料的色散特性与  $\text{ZnS}$  是不一样的, 由于膜厚仪控制精度的限制和简化镀膜工艺, 这两种材料用的是同一个监控波长, 这可以在以后的工作中加以改进。总之, 用相邻膜层厚度相等的膜系设计方法可以大大改善膜层的机械特性、简化镀膜工艺、提高产品成品率, 克服以往膜系的脱膜等缺点。

## 参 考 文 献

- 1 林永昌, 卢微强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990. 239
- 2 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. *Appl. Opt.*, 1978, 17(17):2798~2800
- 3 熊胜明, 张云洞, 唐晋发. DF 化学激光窗口低损耗增透膜. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4):437~441