

高能 CO₂激光腔镜高反介质薄膜的传输特性^{*}

彭玉峰^{1,2}, 程祖海¹, 崔金玲², 张 毅², 张 虎², 余文峰¹

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

2. 河南师范大学 物理与信息工程学院, 河南 新乡 453007)

摘 要: 为了获得适用于高能 CO₂激光器的高抗破坏阈值高反薄膜, 以 10.6 μm 高反膜 ZnSe/YbF₃, PbTe/BaF₂膜系为例, 数值模拟了激光在高反介质膜中的传输的场特性; 给出了激光在多层介质膜中的场强分布、温度场分布及热应力分布。结果表明硅镜基体上的 PbTe/BaF₂膜系所需膜层厚度小、膜层数少, 反射率可高达 99.98%。

关键词: 二氧化碳激光器; 反射镜; 介质薄膜; 激光损伤⁺

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0555-03

Optical transmission characteristics of high reflective dielectric coatings for high energy CO₂ laser mirror

PENG Yu-feng^{1,2}, CHENG Zu-hai¹, CUI Jin-ling², ZHANG Yi,
ZHANG Hu², YU Wen-feng¹

(1. Inst. of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong Univ. of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Coll. of Physics and Information Engineering

Henan Normal Univ., Xinxiang 453007, China)

Abstract In order to achieve high-reflective coating with high quality and high damage threshold in high-energy CO₂ laser, taking example for ZnSe/YbF₃ and PbTe/BaF₂ dielectric coatings at 10.6 μm, the transmission characteristics of laser field in the high reflective coatings are numerically simulated. The laser intensity distribution within the coatings, temperature and thermal stress distribution caused by laser filed are obtained and discussed. The calculation results show that silicon mirror with PbTe/BaF₂ coatings has the advantages of less coating thickness, higher reflectivity, up to 99.98% compared with ZnSe/YbF₃.

Key words Carbon dioxide laser; Reflectoscope; Dielectric film; Laser damage⁺

1 引 言

对于高能激光器, 光学元件表面上镀高反膜或增透膜是不可缺少的环节。原理上讲, 在光学元件表面镀多层介质膜可以得到所需的任意反射率。实际上由于膜层中的吸收、散射损失, 当膜系达到一定层数时, 继续加镀膜层并不能提高其反射率, 相反由于吸收、散射损耗的增加, 而使反射率下降。薄膜的吸收损耗是薄膜材料的一种属性, 它可以是材料的本征吸收, 也可能是由于杂质或化学组分、结构的缺陷造成

的。虽然膜层厚度只不过是 10 λ量级 (λ为氦氛激光波长), 光学元件的总吸收能量较小, 但由于吸收的能量集中在薄膜层部位, 因此成为导致镜面膜层损伤的一个重要因素^[1,2]。

随着高能激光器, 尤其是 CO₂激光器的不断发展^[3~5], 对激光光学元件的性能要求越来越高。为了满足实际需要, 用于 CO₂激光器的高反射激光腔镜的反射率应达到 99.90% 以上, 以减少镜面热畸变, 提高其抗激光损伤能力。早在十多年前, 美国的有关专家就把解决激光薄膜作为急待解决的关键技术。

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-26

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 彭玉峰 (1963—), 男, 博士, 研究领域为新型激光器及其关键技术。

本文将以 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 高反膜 ZnSe/YbF_3 , PbTe/BaF_2 膜系为例, 研究强激光在高反膜中的传输特性; 利用 TFCALC 薄膜设计软件, 给出激光场在多层膜中的场强分布; 利用有限元软件数值模拟温度场分布及热应力分布。

2 ZnSe/YbF_3 膜系反射特性与光场强度分布

选取膜系结构为 $\text{S}/(\text{IH})^7/\text{A}$, 其中 S 代表硅基片, H, L 分别代表膜厚为 $\lambda_0/4$ ($\lambda_0 = 10.6\text{ }\mu\text{m}$) 的高、低折射率膜层, 它们分别为 ZnSe 和 YbF_3 。 ZnSe 折射率和消光系数为 2.4 和 1.76×10^{-6} , YbF_3 折射率和消光系数为 1.48 和 0.0031, 基板厚度为 10 mm。利用薄膜设计软件 TFCALC3.4 计算得到了该膜系的反射率光谱曲线, 如图 1 所示。

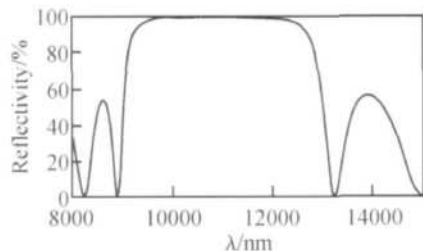


Fig. 1 Reflectivity of silicon mirror with ZnSe/YbF_3 coatings

结果表明: 用这两种材料制备的反射膜所能达到的正入射反射率极限值为 99.3% ($\lambda_0 = 10.6\text{ }\mu\text{m}$); 总膜层数为 14 层, 膜层总厚度为 $20.34\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 2 所示为激光在膜层中的相对场强分布情况。图中横轴上, M 表示空气层, S 表示基板, 1~14 表示膜层编号; 纵轴表示光场的相对光强分布。由图可以看出: 对于高反膜, 激光场在膜层中传输时, 由于膜层间不仅存在反射, 而且还存在光场之间的相互干涉, 从而实现绝大部分入射光被反射。对多层介质薄膜而言, 激光在每层膜中都将形成驻波。除此之外, 但仍有少部分光场能量滞留在膜层的前部 (靠近空气层), 这部分能量若被薄膜吸收, 则会导致膜层温度迅速上升。当温度上升到或接近薄膜材料的熔点时, 膜层即会熔化, 从而使得反射镜无法正常工作。

由图 2 不难看出: 光场的峰值强度大都处于膜层的交界面处 (例如, 薄膜 13 层与 14 层的交界面), 这样将可能造成交界面处的温升较高, 是导致膜层脱落的主要因素。因此在进行膜层设计时, 应尽可能地让峰值光强处于吸收系数较小的膜层 (如 ZnSe 膜层), 以提高薄膜抗激光损伤能力。

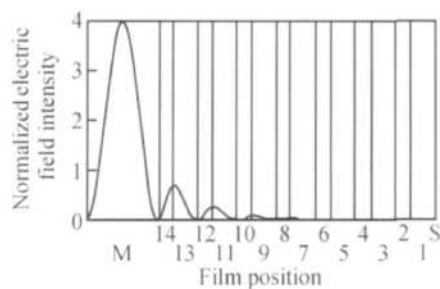


Fig. 2 Relative light intensity distribution in ZnSe/YbF_3 coatings

3 PbTe/BaF_2 膜系反射特性与光场强度分布

选取膜系结构仍为 $\text{S}/(\text{IH})^3/\text{A}$, 其中 S 代表硅基片, H, L 分别代表膜厚为 $\lambda_0/4$ ($\lambda_0 = 10.6\text{ }\mu\text{m}$) 的高、低折射率膜层, 它们分别为 PbTe 和 BaF_2 。 PbTe 的折射率为 5.5, BaF_2 折射率为 1.35, 基板厚度为 10 mm。结果表明: 用这两种材料制备的反射膜所能达到的正入射反射率极限值为 99.98% ($\lambda_0 = 10.6\text{ }\mu\text{m}$)。总膜层数为 6 层, 膜层总厚度为 $7.835\text{ }\mu\text{m}$ 。

图 3 所示为激光在 PbTe/BaF_2 膜层中的相对场强分布情况。图中横轴上, M 表示空气层, S 表示基板, 1~6 表示膜层编号; 纵轴表示光场的相对光强分布。由图可以看出: 对于高反膜, 除绝大部分入射光被反射外, 仍有少部分光场能量滞留在膜层的前部 (靠近空气层)。另外, 光场的峰值强度处于膜层的交界面处, 这样就可能造成膜层交界面处的温升较高, 从而容易导致膜层脱落。因此在进行膜层设计时, 应尽可能地让峰值光强处于吸收系数较小的膜层 (如 BaF_2 膜层), 以提高薄膜抗激光损伤能力。

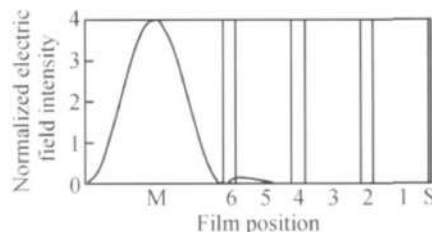


Fig. 3 Relative light intensity distribution in PbTe/BaF_2 coatings

比较图 2 和 3 可以看出, ZnSe/YbF_3 和 PbTe/BaF_2 两种膜系的光强分布结构基本相同, 即膜层中的光场能量大都集中在诸多膜层的前部 (靠近空气层), 尤其靠近激光入射面的第一个膜层界面的峰值光强较大, 因此最容易被激光破坏。但 ZnSe/YbF_3 和 PbTe/BaF_2 两种膜系的反射特性也有差别, 即滞留在 ZnSe/YbF_3 膜层中峰值光场强度比 PbTe/BaF_2 膜层中

的峰值强度较大,致使 ZnSe/YbF₃膜层的反射率(99.3%)小于 PbTe/BaF₂的反射率(99.98%); PbTe/BaF₂膜系所需膜层数较少、总厚度较低,从而可以减少膜层镀制时间。

根据上述数值模拟结果可以看出: PbTe/BaF₂膜系硅镜的突出特点在于膜层厚度小、膜层数少,这样有利于降低散射损耗。另外, PbTe/BaF₂膜层内的峰值光场强度明显低于 ZnSe/YbF₃膜层的峰值场强。因此 PbTe/BaF₂膜系的反射镜不仅反射率高,而且将具有较高的激光损伤阈值,具有潜在的应用前景。

4 多层介质膜的温度场及热应力分布

以硅基 ZnSe/YbF₃膜系为例,研究多层介质膜的温度场及热应力分布。膜系结构为 A/(HL)⁵/S, ZnSe的膜层厚度为 1.1 μm, YbF₃的膜层厚度为 1.8 μm,总厚度为 20.34 μm。激光脉冲宽度为 1.5 μs,光斑尺寸为 5×5 mm²,镜面反射率为 99.95%。

图 4给出了当激光脉冲为 1.5 μs,光斑尺寸为 5×5 mm²,镜面吸收单脉冲能量为 0.01 J时镜面中心轴向的温升分布情况。由图可以看出:镜面的外表层区域温升较高(最大温升 72.8℃),沿轴向形成明显的温度梯度。图 5所示为镜面膜层内的 Von Mises 等效应力沿轴向的分布情况。

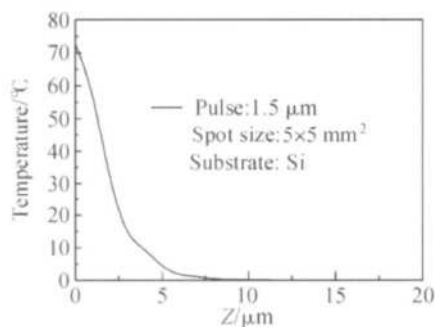


Fig. 4 Axial temperature distribution in the coatings with stack A/(HL)⁵/S

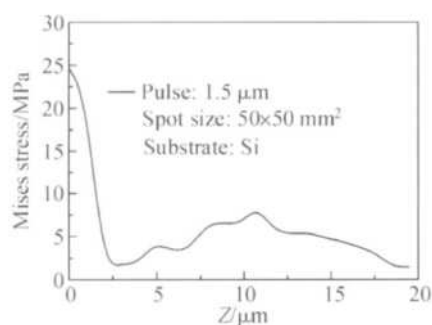


Fig. 5 Axial distribution of Von Mises stress in the coatings

5 结 论

随着高能二氧化碳激光器输出能量的不断提高,对作为核心部件的激光腔镜反射特性的要求亦愈来愈苛刻。由于传统的金膜反射镜的性能难以满足新技术的发展要求,而普通的高反介质膜在实际镀制过程中又要受到激光波长(10.6 μm)的限制,高反介质膜层数多,膜层厚度较大,易脱落,抗激光损伤能力较弱。因此,探索适应二氧化碳激光器要求的高反介质膜新材料、新膜系结构具有重要的现实意义。本文通过以 10.6 μm 高反膜 ZnSe/YbF₃, PbTe/BaF₂膜系为例,研究了激光场在高反膜中的传输特性以及场强分布;数值模拟了 ZnSe/YbF₃膜系激光场引起的温升空间分布及热应力分布。研究结果显示: PbTe/BaF₂膜系硅镜所需膜层厚度小、膜层数少,这样有利于降低散射损耗。另外, PbTe/BaF₂膜层内的滞留峰值光场强度明显低于 ZnSe/YbF₃膜层的峰值场强,而且反射率高,有利于提高反射镜的激光损伤阈值,具有潜在的应用前景。

参考文献:

- [1] Itoh M, Endo A, Kuroda K, et al. Laser-induced damage threshold and absorption measurements in rare-gas-halide excimer laser components [J]. *Opt Comm.*, 1989, 74 (3-4): 253~260
- [2] Mansuripur M, Connell G A N, Joseph W G. Laser-induced local heating of multilayers [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(6): 1106~1114
- [3] Landis G A. Small laser-pushed lightsail interstellar probe: a study of parameter variations [J]. *J. British Interplanetary Society*, 1997, 50(4): 149~154
- [4] Pakhomov A V, Gregory D A. Ablative laser propulsion: an old concept revisited [J]. *AIAA Journal*, 2000, 38: 725~727.
- [5] Hiroyasu Ishikawa, Itsuro Kajiwara, Kentaro Hoshino, et al. Development of laser propulsion and tracking system for laser-driven micro-airplane [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 702: 342~356

(编辑: 刘萝威)