

文章编号: 1001-5078 (2006) 12-01157-03

中红外激光器光学薄膜的研制

洪冬梅, 岳 威

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 文章讨论了中红外波段激光器使用的一系列光学薄膜的设计方法和制备工艺。膜系类型涉及截止滤光膜、增透膜与高反膜, 根据对称匹配膜层的理论, 利用计算机膜系设计优化软件对膜系进行优化后, 得到了损耗小、利于制备、重复性好的膜系结构, 并且在完成多次实际制备过程后, 分析了离子束预处理和离子源辅助蒸发对膜层的影响, 确定最优参数的设定值后取得了较好的效果。

关键词: 光学薄膜; 中红外; 对称匹配层; 计算机优化; 离子源

中图分类号: TN977

文献标识码: A

Research of Optical Films for Middle Infrared Lasers

HONG Dongmei, YUE Wei

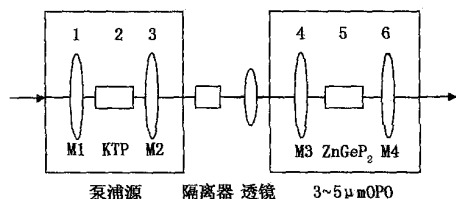
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: A series of techniques for optical thin films at middle infrared band are discussed in the paper, including edge filters, high reflection and antireflection coatings. According to the analytical theory of designing symmetrical match layers, the coating designs of low loss and high reliability have been developed based on the using of computer coating optimization software. At the same time, the influences of pretreatment and plasma source also have been analyzed in the course of preparation and good results have been gotten.

Key words: optical films; middle infrared; symmetrical match layers; computer coating optimization; plasma source

1 引 言

众所周知, $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中红外波段是重要的大气窗口, 也是红外探测器的主要工作区域, 该波段激光对大雾、烟尘等具有较强的穿透力, 在海平面上传输受到的气体分子吸收和悬浮物散射的影响很小。近年来, 针对中红外波段激光器的研究课题逐渐成为了热点, 而光学薄膜也恰是激光系统中不可或缺的重要组成部分。本文所涉及到的几种光学薄膜的应用如图 1 所示。



1. 输入镜 M1 (CaF_2): 1. $06\mu\text{mAR}$ 2. $12\mu\text{mHR}$; 2. KTP 晶体: 1. $06\mu\text{m}$ & 2. $12\mu\text{mAR}$; 3. 输出镜 M2 (CaF_2): 1. $06\mu\text{mHR}$ 2. $12\mu\text{m}$ 部分 T; 4. 输入镜 M3 (CaF_2): 2. $12\mu\text{mAR}$ 3. $5\sim 4.5\mu\text{mHR}$; 5. ZnGeP_2 晶体: 2. $12\mu\text{mAR}$ 3. $5\sim 4.5\mu\text{mAR}$; 6. 输出镜 M4: 2. $12\mu\text{mHR}$ 3. $5\sim 4.5\mu\text{m}$ 部分 T

图 1 中红外激光器器件与其光学薄膜

在激光器件中, 光学薄膜构成谐振腔。在激光行波放大中, 由它构成隔离、滤波、扩孔、透光器件。在激光传输中, 由它组成反光、折光、分光、合束元件。对于激光器来说, 由于光学薄膜相对于其它元件具有较低的抗激光强度, 所以它的破坏阈值是系统设计的重要依据和最大限制。因此, 改进光学薄膜的性能, 减少其损耗, 提高破坏阈值, 是激光器研究的重要课题之一。对于中红外波段的激光器, 对光学薄膜又提出了新的要求: 既要适用于中红外波段, 又要使用抗激光损伤的薄膜材料并改善制备工艺, 以提高损伤阈值, 同时还要满足其光谱特性。

本文针对几种中红外波段的光学薄膜进行了理论分析和优化设计, 并在此基础上从改善制备工艺的角度进行了探讨, 对薄膜和激光器的实验工作有一定参考价值。

作者简介: 洪冬梅 (1970 -), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学薄膜的研究工作。

收稿日期: 2006-07-16

2 膜系设计

2.1 应用于输入镜的截止滤光膜

以镀制在氟化钙基片上的 $2.12\mu\text{mHT}$ 、 $3.5\sim 4.5\mu\text{mHR}$ 膜为例 (CaF_2 单晶广泛应用于光电倍增管、准分子激光器以及紫外可见和红外光学系统等领域的光学晶体, $n_s = 1.45$, 透过波段: $0.13\sim 9\mu\text{m}$; 透过率: $>90\%$; 密度: $3.18\text{g}/\text{cm}^3$; 杨氏模量: 146.1GPa)。

优化膜系结构常用的方法是在多层膜的每一侧加镀匹配层^[1], 使它同基片以及入射介质匹配起来。如果在多层膜与基片之间, 插入一个光纳为 n_3 的 $\lambda/4$ 奇数倍膜层; 而在多层膜与入射介质之间插入一个光纳为 n_1 的 $\lambda/4$ 奇数倍膜层, 则只要 $n_3 = \sqrt{n_s E}$ 和 $n_1 = \sqrt{n_0 E}$, 再经过膜系软件对光谱波段优化后就得到很好的匹配。优化前后的多层膜界面如图 2 所示。

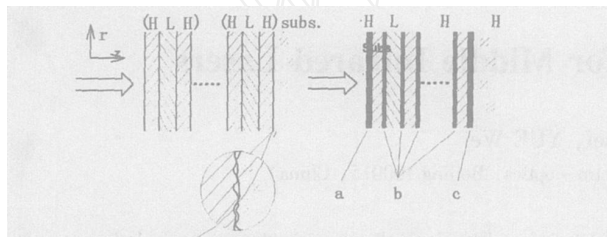


图 2 多层膜界面的结构图

膜系初始结构为 $G/(HL)^{\wedge}SH0.5L/AIR$, S 取 12 , 截止深度已足够。为了避免截止滤光片半波孔的影响, 取匹配波长 $\lambda = 3920\text{nm}$ 。膜系基本结构在匹配波长 3920nm 处等效光纳 $E = 1.297$ 。需要在多层膜两侧添加匹配层。由于基底折射率 $n_s = 1.45$, 因此需在多层膜与基底之间添加 $n_3 = 1.371$, 位相厚度为 $\lambda/4$ 奇数倍的匹配层^[2]。利用公式算得位相厚度 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n d \cos\theta$, 并利用计算机膜系软件优化后, 可得在 $\lambda_0 = 3920\text{nm}$ 处, 匹配层结构为 $0.991H0.804L0.992H$ 和 $1.121L0.963H0.439L$, 则膜系的完成结构为: $G/0.991H0.804L0.992H(LH)^{\wedge}101.121L0.963H0.439L/A$, G : 基体 ($n_s = 1.45$), A : 空气 ($n_0 = 1$)。设计光谱曲线如图 3 所示, $2.12\mu\text{m}$ 处高透射率, $3.5\sim 4.5\mu\text{m}$ 处高反射率, 实测指标为: $T_{2.12} \geq 99\%$, $R_{3.5\sim 4.5} \geq 99.5\%$ 。

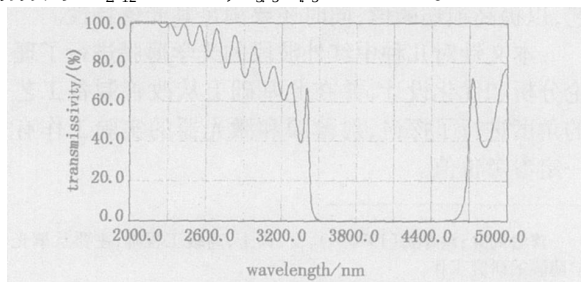


图 3 截止滤光膜系设计曲线

2.2 应用于调制晶体的双波段增透膜

以镀制在 ZnGeP_2 晶体上的 $2.12\mu\text{m}$ 和 $3.5\sim 4.5\mu\text{mAR}$ 膜为例 (ZnGeP_2 晶体具有宽的透明范围 $0.7\sim 12\mu\text{m}$, 较大的非线性系数 $d_{36} = 75\text{pm}/\text{V}$, 最高损伤阈值能量密度为 $10\text{J}/\text{cm}^2$, 较高的热导率 $0.18\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 因而非常适合作为高功率中红外光参量振荡器 (OPO) 晶体^[3]。设计了在中红外双波段范围内剩余反射 $\leq 0.01\%$ 的增透膜。增透范围宽, 能避免基底材料带有一定曲率、测量误差等造成的测量光谱曲线与实际使用曲线不吻合的缺点, 并提高了制备重复性。图 4 显示了在 ZnGeP_2 晶体上镀 $2.12\mu\text{m}$ 和 $3.5\sim 4.5\mu\text{mAR}$ 的双波段多层增透膜的设计曲线。

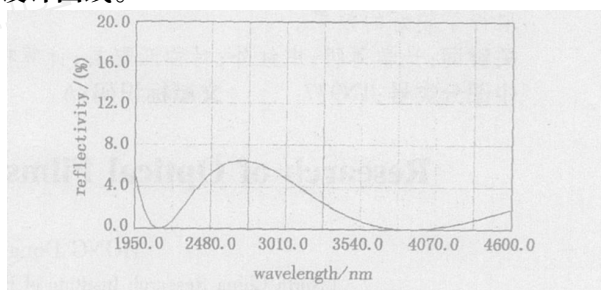


图 4 双波段增透膜设计曲线

这种膜系结构是从传统的分析方法入手, 设计初始结构为 $\lambda/4$ 膜系, 再利用 $\lambda/2$ 的虚设层概念, 插入 n_2 的虚设层, $n_2 d_2 = \lambda/2$, 在中心波长两侧得到两个反射率为零的点之后, 计算优化得到的非 $\lambda/4$ 膜结构: $G/0.634H0.400L0.422H1.367L/Air$, 其中

$$n_2^2 - \frac{n_2 n_g}{2 n_1 n_0} (n_0^2 + n_2^2) (n_1 + n_2) + n_1 n_g^2 = 0$$
, n_g 、 n_0 是基底和入射介质的折射率。设计波长在 2600nm , 为了产生零剩余反射, 第一层膜的折射率理论上应该满足: $(n_1 \times n_3) / n_2 = n_g^{1/2}$ 。实测指标为: $T_{2.12} \geq 95\%$, $T_{3.5\sim 4.5} \geq 95\%$ 。

2.3 应用于输出镜的高反射和部分透过膜

以镀制在氟化钙基片上的 $2.12\mu\text{mHR}$ 和 $3.6\sim 4.4\mu\text{mT} = 50\%$ 膜为例。全介质高反射膜最重要的应用是在激光领域, 比如高功率激光器、激光陀螺仪、激光核聚变等, 都要求薄膜有尽可能低的吸收散射和有尽可能高的反射率。理论上每增加一个介质膜对, 可使透射率缩小 $(\frac{n_l}{n_h})^2$ 倍, 但反射率趋于

100% 时, 增加膜对提高的反射率就不足以补偿由此带来的吸收和散射损失, 同时反射带的宽度并不增加, 只是增大了反射带两侧波纹振荡的数目^[4]。由

反射带宽公式 $\Delta g = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} (\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L})$ 选择设计波长

2060nm , 在 CaF_2 基体上镀制不同中心波长的高反射膜系, 减少 $3.6\sim 4.4\mu\text{m}$ 波段的膜对, 并针对

(HL) $\wedge$ 12 (1. 88H 1. 88L) $\wedge$ 21. 88H的初始结构和部分透过 $T=50\%$ 的目标进行优化,最终得到 0. 875H 0. 813L 1. 672H (LH) $\wedge$ 101. 954L 3. 005H 1. 213L 0. 837H的结构,设计曲线如图 5所示,2. 12 μ m处高反射率,3. 6~4. 4 μ m处透过率为 50%,实测指标为: $T_{2. 12} \leq 0. 01\%$, $49\% \leq T_{3. 5 \sim 4. 5} \leq 51\%$ 。

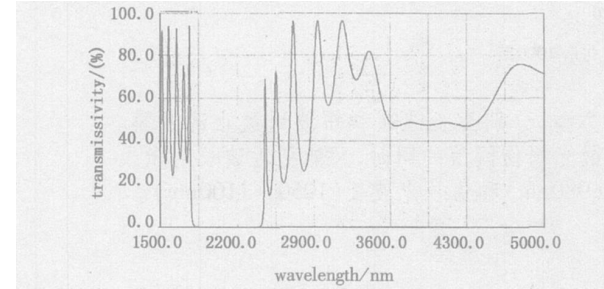


图 5 高反射和部分透过膜设计曲线

3 制备工艺

3. 1 离子束清洗预处理

定向离子清洗可有效去除二次污染、增加基片表面结合能、控制基片表面粗糙度和表面形貌,是一种有效改善基片表面性质的处理方法^[5]。

镀膜设备为具有冷凝泵系统、行星转动装置和 APS离子源的德国 LEYBOLD 设备。采用电子枪蒸发材料,石英晶体控制蒸发速率和膜厚。H层蒸发速率为 0. 3nm/s,L层为 0. 6nm/s。离子处理后表面粗糙度明显降低,也是激光损伤阈值升高的原因之一,膜层的表面形貌对比如图 6所示。

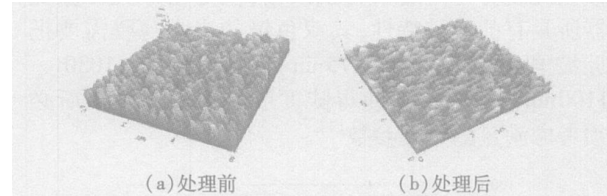


图 6 膜层表面粗糙度对比

为提高高功率激光薄膜的抗激光损伤能力,用 APS离子源在不同清洗参数下对 CaF₂ 基片进行了清洗,在光学显微镜下验证了基片的二次污染和离子的清洗效果,最终找到了适用于中红外波段光学薄膜的理想离子源参数设定,如表 1所示。

表 1 离子束预处理的 APS源参数

发射电流 (A)	辉光电压 (V)	功率 (kW)	偏置电压 (V)	环流 (A)
40. 1	74. 6	2. 6	80. 9	1. 24
真空度均在 3×10^{-3} Pa; 温度为 130℃; 氩气流量为 8. 0sccm				

3. 2 离子源辅助沉积

在传统的蒸发技术中,热蒸发(电阻热蒸发和电子束蒸发)仍然是光学薄膜大量生产的主要手段,广泛用于光学薄膜的镀制,但由于凝聚粒子的能量低,热蒸发薄膜的堆积密度较低,具有明显的柱状结构,造成膜本身不稳定,光机性能的蜕变和降低。

用 LEYBOLD 设备的 APS离子源在基板和蒸发源间可以建立稳定的等离子区,由于外来离子对凝聚中粒子的动量传递,使得凝聚粒子的移动性增加,材料原子在通过等离子区的时候被加速而获得能量,从而导致高的堆积密度。高能离子的轰击使基板得到了清洁,获得了高温,促进了膜层材料的表面扩散和化学反应,甚至产生了注入效应。这不仅可以改进薄膜的致密性、均匀性和稳定性,克服阴影效应以提高薄膜的折射率和损伤阈值,在适当的条件下,还可以有效地降低薄膜的吸收,LEYBOLD 设备的 APS源辅助蒸发状态如图 7所示,具体参数见表 2。

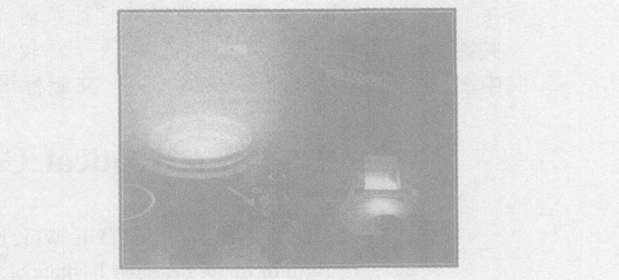


图 7 离子源辅助蒸发

表 2 辅助沉积的 APS源参数

发射电流 (A)	辉光电压 (V)	功率 (kW)	偏置电压 (V)	环流 (A)
50. 2	112. 8	5. 7	124. 4	1. 73
真空度均在 $2. 4 \times 10^{-3}$ Pa; 温度为 150℃; 氩气流量为 16sccm				

4 小 结

本文所涉及到的几种薄膜,已经成为中红外激光器件研究不可缺少的完整配套部分。目前,这一整套的薄膜都已经良好地应用于激光器相关的研究工作中。

我国在中红外固体激光技术方面的研究处于基础阶段,作为中红外激光器的重要支撑技术,开展相应的光学薄膜技术研究势在必行。该项研究涉及到的环节很多,在膜层的材料、应力、缺陷、表面形貌、基底特性、温度场影响和损伤阈值等多方面都还需要做进一步大量的工作。

参考文献:

[1] M R Kozlowski, IM Thomas High-power optical coatings for a mega-joule class ICF laser[A]. Proc SPIE, 1992, 1782: 105 - 119

[2] Tmch R J, Kozlów skM R, Chow R. Investigation of microstructure of coatings for high power lasers by nonoptical techniques[A]. Proc SPIE, 1994, 2253: 596 - 602

[3] 姚宝权,王月珠,王骥. 中红外光参量振荡器发展状况分析[J]. 激光技术, 2002, (6): 217 - 220

[4] 朱震. 二极管泵浦 Nd:YVO₄ 倍频激光器使用的光学薄膜[J]. 激光与红外, 2001, (4): 118 - 120

[5] 张大伟,张东平. 定向离子清洗对基片表面性质的影响[J]. 中国激光, 2004, 12