

## 用于 YAG 激光器聚光腔的高反膜系

骆青 李晓平 胡菁 黄维玲 卢宏 冯功和 陈清明

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

**摘要:** 本文介绍了一种用于 YAG 激光器聚光腔的高反射膜系的设计与制备技术。膜系设计采用总极值法和共轭方向法相结合的优化方法, 并考虑色散和系统误差的影响。获得了结构简单、制备容易、实用的高反射膜系。

**关键词:** YAG 激光器 聚光腔 高反膜

## High-reflectance coatings for ellipsoidal reflectors used in YAG lasers

*Luo Qing, Li Xiaoping, Hu Jing, Huang Weiling*

*Lu Hong, Feng Gonghe, Chen Qingming*

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

**Abstract:** A kind of design and manufacturing techniques for high-reflectance coatings of YAG lasers ellipsoidal reflectors are introduced in this paper. The statistical global-extreme-value method and Powell conjugate direction method are used in optimizing design. Effect of dispersion and systematic error are considered. Thus a practical and easily made high-reflectance coating system with simple construction is achieved.

**Key words:** YAG laser ellipsoidal reflector high-reflectance coating

### 一、引言

YAG 激光器广泛用于科研, 医疗, 加工, 测量等各个领域。但由于固体激光器多采用灯泵浦方式产生激光, 一般说, 能量损失较多。为提高效率, 很重要的一步就是设计合理的聚光腔和高反膜系, 尽可能地提高对泵浦光的反射, 尤其使对应于 YAG 吸收带的光能尽可能地反射, 以此提高能量的转换效率, 因此, 设计性能优良的高反膜系就显得十分重要。

根据膜系设计理论, 金属膜上加镀介质膜可有效地提高反射率。由于银膜的高反区一直近紫外延伸到红外。而 YAG 的吸收带(0.53 $\mu\text{m}$ , 0.58 $\mu\text{m}$ , 0.75 $\mu\text{m}$ , 0.81 $\mu\text{m}$ , 0.87 $\mu\text{m}$ )基本集中在可见光区、近红外区, 所以普遍采用银作为金属膜材料<sup>[3]</sup>。此外, 紫外光不利于 YAG 的激光增益, 应进行有效的抑制。一般情况下, 银膜加镀介质膜后, 介质膜对银膜有保护作用, 但是若介质膜设计不当, 聚光腔内的银膜还是易氧化变黑, 致使效率迅速下降, 为此, 必须设计合理的介质膜对银膜加以保护, 进一步提高反射率, 并加强对聚光腔的冷却。本文提出的由优化计算得出的介质膜系, 性能稳定, 既提高了银膜的反射率, 又有效地增强了对银膜的保护。

### 二、原理与设计

#### 1. 膜系结构的设计

银膜与大多数材料的结合性较差, 镀在其上的膜易脱落。但它能与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  很好地粘附, 因此我们以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为银与其它材料结合的过渡层。由于  $\text{TiO}_2$  具有较高的折射率, 和低折射率

的  $Al_2O_3$  组合, 可有效地提高反射率。从理论上说, 增加膜层周期数, 有利于反射率的提高, 但膜层过多, 吸收会相应增大, 且银本身就具有较高反射率; 另外,  $TiO_2$  性质稳定, 膜层坚硬, 对银膜有很强的保护作用。  $SiO_2$  膜的结构精细, 呈网状的玻璃态, 对膜层有极强的保护作用(抗潮气侵蚀、机械强度等方面),  $SiO_2$  能与  $TiO_2$  很好的粘附, 最外层加镀  $SiO_2$  后更能增强对银膜的保护。

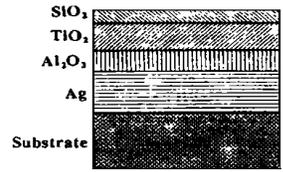


Fig. 1 Construction of coating system

设计的聚光腔高反膜结构如图 1 所示, 即聚光腔  $Ag-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2$  空气的结构。

### 2. 高反膜系优化设计原理及方法

从文献[1]中的基础公式出发, 我们采用自行编制的膜系优化设计程序对两种膜系进行计算。该套程序的出发点为: 通过讨论给定结构参数下薄膜系统的反射率(或其它特性参数)与理想状态的目标反射率(或其它特性参数)之间的偏差, 把薄膜设计问题归结为选取结构参数, 使得这种偏差尽可能地小。这个问题在数学上也就是求多元函数的极小值。因此, 在设计具体膜系时, 首先制定描述上述偏差与薄膜结构的依存关系, 即必须构造评价函数。它是一个以结构参数作为变量的多元函数。我们利用评价函数作为评定薄膜系统质量高低的定量指标, 在这个基础上, 再用最优化方法求评价函数的最优解<sup>[2]</sup>。

考虑到聚光腔的作用, 以尽可能高的反射率为目标, 对各层膜厚度进行优化, 获取可镀制的参数。选取计算最为方便的平方型评价函数

$$F = \left\{ (1/L) \sum_{\lambda} \omega_{\lambda} [R(\lambda) - RD(\lambda)]^2 \right\}^{1/2} \quad si$$

式中,  $R(\lambda)$  为各波点处计算膜系的 S, P 波的反射率,  $RD(\lambda)$  为各波点处理想膜系的 S, P 波的反射率,  $\omega_{\lambda}$  为各波点所取的权重且  $\omega_{\lambda} > 0$ 。

针对 YAG 激光器, 我们取十个波点进行计算, 其中五个波点为 YAG 吸收带的中心波长 (0.53 $\mu$ m, 0.58 $\mu$ m, 0.75 $\mu$ m, 0.81 $\mu$ m, 0.87 $\mu$ m), 且将这些波点的权重取为最大, 即保证在这些点上反射率最高, 并以最强吸收带 0.75 $\mu$ m 作为计算的参考波长。采用统计实验求总极值法 (SGEV) 和 POWELL 共轭方向法 (PCDM) 相结合算法。输入各波点及每层在该点折射率和吸收系数, 以及目标反射率, 搜索范围, 精度要求等, 由 SGEV 法找出接近要求的膜层参数值, 再将它们作为初始数据代入 PCDM 中进一步优化, 最终得出满足反射率要求的各层膜的厚度值, 供镀制使用。这种方法得到的膜层的光学厚度往往是非四分之一波长的。

### 3. 色散的考虑

所设计的膜系在整个可见光及近红外范围都要有高反射率, 而材料不可避免地存在着色散。尤其是银膜, 其折射率从 0.4 $\mu$ m 的 0.075 变到 0.95 $\mu$ m 的 0.110, 而吸收系数则从 1.93 变到 6.56, 介质膜的折射率也有或多或少的变化, 因此需考虑色散的影响。要逐点输入各波长对应的折射率  $n$  和吸收系数  $k$ 。而对于介质膜, 采取自动计算的方法, 即在优化程序中归纳多种典型的色散公式, 如

$$n = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4 \quad (1)$$

$$n = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 \quad (2)$$

$$n^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} + \frac{K_4 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_4^2} + \frac{K_5 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_5^2} \quad (3)$$

$$n^2 = A + B\lambda^2 + C\lambda^4 + D/(\lambda^2 - E) \quad (4)$$

$$n^2 = A + B/\lambda^2 \quad (5)$$

运算时根据不同的材料选择相应公式, 如:  $Al_2O_3$  选择公式 (3),  $SiO_2$  选择公式 (1),  $TiO_2$  用公式 (5), 并输入系数, 由计算机自行算出折射率值, 并赋给与波长对应的数组。某些没有确切公式的介质材料, 也可逐点输入其折射率。这样一来, 计算结果就与实际更为符合, 膜系的质量也大为提高。

### 三、优化结果与误差分析

经过优化计算, 得出膜系在十个波点上的反射率, 结构参数列于附表中, 反射率曲线绘于图 2 中。考虑到薄膜镀制过程中可能产生的误差, 我们在所设计的膜系中人为地加入  $\pm 5\%$  和  $\pm 10\%$  的误差, 经计算得出反射率, 其曲线亦绘于图 2 中。

Table Constructive parameters of  $Ag-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2$

film	Ag	$Al_2O_3$	$TiO_2$	$SiO_2$
thickness (nm)	200.0	83.0	130.0	52.5

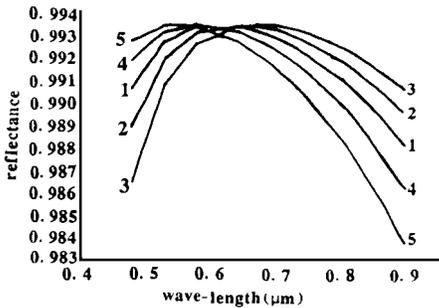


Fig. 2 Reflective curves of the coating system

1- theoretical reflectance 2- reflectance with error of 5% 3- reflectance with error of 10% 4- reflectance with error of - 5% 5- reflectance with error of - 10%

由图中可以看出, 除误差为 10% 时长波段的反射率有较大下降外, 其余情况下大多数波点仍有较高反射率。且误差为正时, 反射率的峰值向长波方向移动, 误差为负时, 反射率峰值向短波方向移动。

此外, 理论计算过程中, 均假设入射角为零度, 因为考虑到聚光腔腔形为紧包双椭圆柱形, 激光工作物质和泵浦灯平行地置于焦点上, 光线可近似看作垂直入射。考虑入射角后计算所得结果与垂直入射的结果相差甚小。

### 四、实验及结果

膜层厚度及折射率的精确控制与测量是整个制备工艺的关键。由于所镀为非规整膜系, 在实验中

我们对厚度的精确控制采用了晶振法, 现有设备为一台 DMDE-450 型光学多层镀膜机, 难以直接用于非规整膜系的制备, 因为该设备所配的膜厚监控装置是极为普通的极值监控法装置。一般而言, 这种方法的监控精度不高, 所导致的膜厚的相对误差大于  $\pm 5\%$ , 且只适于镀规整膜系。针对这种情况, 我们在真空室内的合适位置上装上了可进行任意厚度监控的石英晶体监控装置(该装置为美国 INFICON 公司的 IC6000 型淀积膜厚监控仪)。这是一种质量厚度监控装置, 于是我们的镀膜设备就成为如图 3 所示(L 为光源, W 为窗口, MR 为聚光腔, C 为晶体记录仪, CD 为晶体显示器, WD 为单色仪, D 为探测器, M 为斩波器, S 为监控基板, EC 为电子坩埚, RC 为抗蒸发皿。)的既有光学监控, 又有物理监控的镀膜设备。辅以美国 Gaertner 手动椭圆仪, 保证了膜厚及折射率的精确控制与测量。

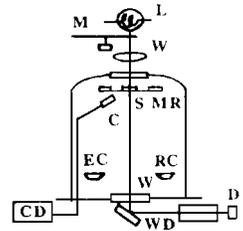


Fig. 3 Schematic diagram of coating machine

将按本设计的膜系镀制的聚光腔, 安装在 YAG 激光器上, 其输出的平均功率由 0.2kW 提高到 0.3kW 左右, 单脉冲能量由 50J 提高到 60J, 平均提高 20% ~ 30%。采用了这种聚光腔的 YAG 激光微焊机已在全国多家单位的生产线上使用。

## 室温下 Ho: YAG 激光器输出 3J 的 2.1 $\mu$ m 激光

叶洪波 邝能俊 朱长虹 李正佳

(华中理工大学激光技术与工程研究院, 武汉, 430074)

摘要: 根据对 2.1 $\mu$ m 波长 Cr, Tm, Ho: YAG 激光器的实验研究, 详细分析了冷却温度、放电脉冲半宽度和输出镜透过率等因素对激光器的输出的影响。

关键词: Cr, Tm, Ho: YAG 晶体 敏化作用

## Ho: YAG laser with 3J output operating at room temperature and 2.1 $\mu$ m wavelength

Ye Hongbo, Kuang Nengjun, Zhu Changhong, Li Zhengjia

(Institute of Laser Technology & Engineering, HUST)

**Abstract:** According to a lot of experimental research to Cr, Tm, Ho: YAG laser operating at 2.1 $\mu$ m wavelength, the factors effecting on the output characteristics, such as cooling temperature, flashlamp pulse width, transparent index of output mirrors, are discussed.

**Key words:** Cr, Tm, Ho: YAG crystal sensitized

### 一、引 言

2 $\mu$ m 波段的激光是当前世界上一个热门的研究方向, 国外, 尤其是美国对它的研究已经开展了多年, 早在 1965 年美国 Johnson 等首先在液氮温度下使 Ho: YAG 激光器输出了 2 $\mu$ m 的激光。由于这种激光器要求的温度极低且阈值很高, 则限制了它的实际应用。最近室温运转的 2 $\mu$ m 激光器的出现, 再一次引起人们的极大注意。

2 $\mu$ m 波段的激光是很有用的, 它在医学、光通讯、遥感和雷达等方面都显示出独特的优良性能。由于水的吸收峰是在 1.93 $\mu$ m 左右, 因此 2 $\mu$ m 激光对组织的吸收不会象 Nd: YAG 激光那样强烈, 因而对组织的穿透深度浅, 有很高的外科手术精度, 且对人眼安全, 更加上它可用光纤进行传输, 所以在医疗上它是一种很好的做外科手术的光源, 另外, CO<sub>2</sub> 的吸收带也在 2 $\mu$ m

通过计算和实验, 可以得出初步结论: (1) 本设计所得膜系能有效地提高反射率, 加强对银膜的保护。(2) 膜厚监控保证将每层膜的膜厚控制在 2% 以内, 膜厚在一定范围内的误差对膜系的反射率影响很小。

### 参 考 文 献

- 1 Macleod H A. Thin Film Optical Filter, Second Edition. New York: Macmillan, 1986
- 2 唐晋发, 郑 权. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- 3 Macleod H A, Song D Y. Improved coatings for large astronomical telescope mirrors. Proc. SPIE, 1985; 542: 25~ 27

\* \* \*

作者简介: 骆 青, 女, 1973 年 5 月出生。从事光学薄膜的研究工作。