

高功率激光圆偏振镜的研究*

陈清明 周凤晴 李晓平 何云贵 王金华

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉)

摘要: 本文研究了高功率激光圆偏振镜的理论分析计算和实验制备, 获得了单片相移差为 90° 的多层介质膜结构的光学器件。

Circular polarizing mirrors for high power lasers

Chen Qingming, Zhou Fengqing, Li Xiaoping, He Yonggui, Wang Jinhua

(National Laboratory of Laser Technology, HUST)

Abstract: In this paper, the circular polarizing mirrors for high power lasers have been theoretically and experimentally studied, the circular polarizing mirror coated with multiple-film, which could induce 90° phase retardation is prepared experimentally.

一、引言

自高功率激光器用于工业加工以后的很长一段时间内, 人们只注意到光束的功率、模式、聚焦后的束斑尺寸、辅助气体等因素对加工的速度和质量的影响, 而忽略了激光束的偏振状态的影响。一般认为, 在激光加工过程中, 激光束是以法线方向入射于被加工材料表面的, 光能在材料中耦合的大小与光束的偏振状态没有关系。80年代初, 丹麦技术大学的Olsen等人在激光切割过程中发现, 光束法向入射于材料表面的这一假设仅在光与材料相互作用的最初阶段是正确的, 一旦切口形成以后, 光束实际上是以掠射方向入射于被加工材料表面的。正因如此, 材料对入射激光能量的反射和吸收受到激光束偏振状态的强烈制约^[1]。例如, 激光切割或焊接时, 不同方向切口或焊缝宽度不一致、切口或焊缝倾斜等等都是由光的偏振状态造成的。光的偏振状态不仅是激光加工中不可忽略的重要因素, 在许多情况下甚至是决定性的因素。80年代中期的大量实验表明, 圆偏振光是切割、焊接这样一些激光加工的最佳光束。使用圆偏振光不仅可以大幅度提高加工速度、优化加工质量、而且能解决其它光束无法解决的加工问题。

获得高功率圆偏振激光束的最后关键是制备光圆偏振镜。本文主要研究激光圆偏振镜的理论计算与实验制备。

二、理论分析与计算

获得高功率圆偏振激光的最好途径是: 在激光谐振腔中使用反射式起偏元件, 让激光器

* 国家七五科技攻关项目子课题。

在不降低效率和功率的情况下输出线偏振光；然后，用圆偏振镜将线偏振光变换为功率基本相同的圆偏振光。这里圆偏振镜的作用类似于一个四分之一波片。现有工业加工用的激光器一般运行在红外波段，光功率500W以上，目前，还找不到一种红外材料既能承受高功率又有显著双折射现象，所以，高功率红外激光器上无法使用透射式四分之一波片。这样，人们就提出了多层薄膜结构的反射式器件^[2]，本文称之为激光圆偏振镜。下面讨论中心波长为10.6 μm 的高功率激光器用的圆偏振镜的理论设计与制备，其设计原理和制备方法适用于其它中心波长的圆偏振镜。

圆偏振镜的设计要求是：第一，在入射角为 $\theta_0 = 45^\circ$ 的情况下(θ_0 为实用中的入射角)，通过适当的布局使线偏振光在镜面上分解为两个相互垂直的矢量，即S波和P波。这两个波的振幅相等，频率相同，但相位差为零。第二，光经薄膜型圆偏振镜反射后，出射光的两分量做到振幅相等并基本保持入射时的幅度，S波和P波的相位延迟差 $\Delta\varphi$ 为 $\pm 90^\circ$ （如果对左、右旋不加区别则只写作 90° ）。这样，出射光实际上就是圆偏振光并且基本上没有能量损失。

从上述要求可以清楚地看到，理想的激光圆偏振镜应满足两个必要条件：

1. 镜面对S波和P波的反射率 R_S 和 R_P 要基本相等并趋近于1，即 $R_S \approx R_P \approx 1$ 。
2. 镜面对S波和P波产生的相位延迟 φ_S 和 φ_P 之差 $\Delta\varphi$ 应为 90° ，即 $\Delta\varphi = \varphi_S - \varphi_P \approx 90^\circ$ 。由于工艺原因，实际光学薄膜型器件与理想值有一定的差距。

圆偏振镜的结构如下：基片为单晶Si；衬底膜材料为Au或Ag；介质膜材料为BaF₂和ZnSe；介质膜层数都是偶数，高低折射率材料交替，与金属衬底膜相接触的一层膜为低折射率材料。研究中介质膜层数分别用过10，12和14。层数多时 $\Delta\varphi$ 在 90° 附近的反射带就宽，但层数过多又会因吸收和散射致使反射率下降。

圆偏振镜膜系理论计算的基础公式和符号约定同文献〔3〕。膜系的特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^K \begin{pmatrix} \cos\delta_j & \frac{j}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

对S波和P波，膜层的位相厚度都是

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos\theta_j \quad (2)$$

折射角 θ_j 由折射定律确定，导纳 η_j 由下面的式子给出

$$\eta_j = \begin{cases} N_j \cos\theta_j & \text{S波} \\ N_j / \cos\theta_j & \text{P波} \end{cases} \quad (3)$$

式中， N_j 为第j层膜材料的折射率，考虑到吸收和金属衬底膜， N_j 一般为复数。多层介质膜和金属衬底层的组合导纳为 $Y = C/B$ ，这样，就有圆偏振镜膜系的反射率

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (4)$$

和反射相位延迟

$$\varphi = \arctg \left[\frac{i\eta_0 (CB^* - BC^*)}{(\eta_0^2 B B^* - CC^*)} \right] \quad (5)$$

式中， η_0 为入射媒质的等效导纳。用(4)式，(5)式分别计算出S、P波所对应的值，就得到 R_S ，

$R_p, \varphi_s, \varphi_p$ 四个值,再由 $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_p$ 得到相移差。

激光圆偏振镜的目标是既有高反射又有适当的相移差,因此它的一个显著特点是膜层非四分之一波长厚度,而且各层都不一样,没有什么周期性,这就给膜系的计算和制备带来极大的困难,使高功率激光圆偏振镜成为最复杂最困难的光学薄膜器件之一。

圆偏振镜的膜系是在计算机上借助最优化方法自动设计出来的。选择第 j 层的光学厚度为 $f_j \cdot \lambda_0/4$, 其中 $f_j \in (0, 1.2)$, 被称为第 j 层的厚度系数, λ_0 为中心波长 (对 CO_2 激光为 $10.6\mu\text{m}$)。计算的目标是在给定的薄膜层数和薄膜材料条件下找到一组 $\{f_j\}$, 使在 λ_0 附近的一个波长区域内,膜系有高的反射率和 90° 的相移差。为此构造了如下的评价函数

$$F = \sum_{\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} (R_s + R_p) + \frac{|\pi/2 - |\Delta\varphi||}{\pi/3} \right]^2 \quad (6)$$

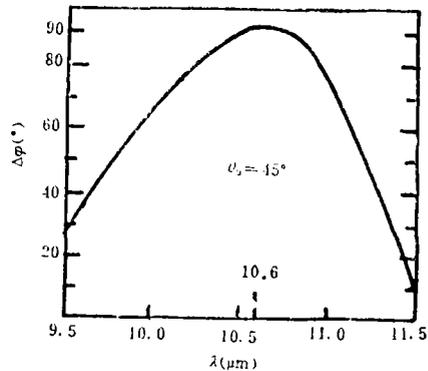
当 $R_s = R_p = 1, \Delta\varphi = \pm\pi/2$ 在 λ_0 附近都成立时, (6) 式中 $F = 0$, 这是理想状态。实际问题是找到一组 $\{f_j\}$ 使 F 取极小值。本文采用非线性阻尼最小二乘法来处理这种优化问题。附表和附图分别是在衬底膜层为 Ag 的情况下计算的三组圆偏振镜膜系的典型 f 值和 14 层膜系的相移

附表 激光圆偏振镜各层的厚度系数 f 计算值

膜层序号	10层镜 f 值	12层镜 f 值	14层镜 f 值
1	0.713	0.724	0.742
2	0.694	0.708	0.714
3	0.586	0.588	0.596
4	0.741	0.752	0.763
5	0.783	0.791	0.806
6	0.857	0.863	0.872
7	0.932	0.934	0.936
8	0.931	0.956	0.962
9	0.958	0.967	0.968
10	0.964	0.968	0.972
11		0.983	0.991
12		0.987	0.993
13			1.080
14			0.996

注: 衬底膜层为 Ag , 第1层朝空气。

差与波长的关系曲线。利用计算机还可进行误差分析。计算表明, 当膜厚和折射率误差均为 $\pm 1\%$ 时, $\Delta\varphi$ 的误差为 $\pm 5\%$; 膜厚和折射率误差均为 $\pm 2\%$, $\Delta\varphi$ 的误差为 $\pm 12\%$ 。 $\Delta\varphi$ 的误差超过 $\pm 10\%$ 后, 圆偏振镜的实用效果就显著变差, 因此在制备过程中应将膜厚和折射率误差控制在 $\pm 2\%$ 以内, 这要求在实验中对膜厚进行精确控制和对折射率进行精确测量。



附图 14层镜的相移差 $\Delta\varphi$ 与波长 λ 的关系曲线

三、实验及结果

激光圆偏振镜的实验研究分为镀膜和测试两部分。镀膜设备是经 DMDE-450 光学多层镀膜机改造而成的。主要的改进是在真空室内适当位置配置了可进行任意物理厚度监控的石英晶振 IC6000 膜厚监控仪。从计算分析知道, 实验的关键在于膜厚及折射率的精确控制与测量。对膜厚的精确控制采用了光学极值与晶振相结合的办法。用高级次法先对晶振进行校

对,然后又反过来用品振实时监控。具体做法是先用光学极值的方法在同一个控制片上用一种材料连续镀40个极值,找出光学厚度与晶振所显示的物理厚度的对应关系。这样校对后的晶振厚度监控仪对任意厚度的膜能进行实时监控。这种方法有一个明显的优点:在极值法中相邻膜层之间能在监控波长上自动地进行补偿,而且避免了分子凝聚特性变化引起的误差。用同一材料镀40个极值,最后一个极值的误差即使有10%,所镀膜层的相对误差只有0.25%,这比普通的光学极值法的控制精度提高了一个数量级以上。实验证明,这种方法对高难度的镀膜有很好的效果,并且十分有利于镀膜自动化。薄膜折射率的精确测量由高精度椭圆偏振仪完成。

制备好了的激光圆偏振镜的性能测量是在高功率CO₂激光器上联机进行的。让CO₂激光器的输出光束通过一个起偏器变为偏振方向与水平面成45°角的线偏振光后,再经镀制的圆偏振镜反射,反射光用一检偏镜分析。通过测量各种不同的检偏角下的功率值,就能进一步计算出 $\Delta\varphi$ 值和R值。这是一种相对测量。分析表明,这种相对测量导致的 $\Delta\varphi$ 和R值的误差分别在 $\pm 2^\circ$ 和 $\pm 1\%$ 以内。本文所研究的激光圆偏振镜的综合测试结果为:反射率 $R = (R_S + R_P) / 2 \geq 98\%$;相移差 $\Delta\varphi = \varphi_S - \varphi_P = 90^\circ \pm 7^\circ$;承受功率密度 $I \geq 1000 \text{ W/cm}^2$ 。这三个参数能满足目前所有激光工业加工对圆偏振镜的要求。

本工作利用国内现有技术、设备和材料,首次研制出有80年代末国际先进水平的激光圆偏振镜,对我国激光加工跨入世界先进行列将起到积极作用。

参 考 文 献

- [1] Olsen F O. Cutting with polarized laser beams. 1st Ed. Lyngby / Denmark; DVS, 1980; 197~200.
- [2] Southwell W H. Appl Opt, 1980; 19(16): 2688
- [3] Macleod H A. Thin film optical filters. 2nd Ed. New York; Macmilan, 1986; 18~30

* * *

作者简介:陈清明,男,1953年5月出生。博士,教授。现从事激光物理,固体物理和光学薄膜的研究工作。

周凤晴,男,1962年11月出生。硕士,讲师。现从事光学薄膜和激光技术的研究工作。

李晓平,男,1962年4月出生。硕士,工程师。现从事光学薄膜和激光技术的研究工作。

何云贵,男,1945年8月出生。高级工程师。现从事激光技术的研究工作。

王金华,女,1939年12月出生。高级工程师。现从事光学测试技术的研究工作。

收稿日期:1992年3月10日。

· 产品简讯 ·

小型TEA CO₂ 激光器

据悉Edinburgh仪器公司将推出一种MTL-3型小型TEA CO₂激光器,在100Hz时输出150mJ。而相干公司则将推出光束分布测试仪,Laser Photonics公司则计划生产氮激光器。

译自Electro Opt, 1992; 22(99):UN23 于祖兰 译 巩马理 校