

大功率CO₂激光器薄膜λ/4波片的制备及薄膜位相延迟的初步研究

初 国 强

摘要: 作为光束均值器, λ/4波片是大功率CO₂激光加工机中的关键部件。多层膜反射镜(包括内反射和外反射), 在倾斜入射时, 两个偏振分量会产生不同的相移, 因此可用计算机优化设计出特定位相差的膜系。本文的目的是设计10.6μm的90°相位膜, 它的作用就象四分之一波片。与传统的波片相比, 它的优点是可以适用于任何波长, 具有高的位相精度和大的孔径。文中提出了两种设计方法, 并报告了制备技术、实验结果及误差分析。

一、前 言

传统的波片是利用晶体的双折射特性制成的, 一般来说制造比较困难, 波长也只能在可见及近红外范围内, 而且价格昂贵。相比之下, 薄膜波片具有更大的灵活性。薄膜波片可以应用于紫外、可见光直至远红外波长区, 可以用于诸如10.6μm的大功率激光器, 这是晶体波片所办不到的, 其次薄膜波片的孔径尺寸可以做得很大, 精度可以很高。

正是因为这样, 近年来薄膜波片引起了人们的重视, 特别是以CO₂激光器加工机的出现, 作为光束均值器, 薄膜λ/4波片成了加工机的关键部件。因为加上λ/4波片以后, 激光加工机的效率可以提高一倍以上, 并且使被加工表面光滑, 无毛刺现象, 这是其它技术手段所难以解决的。目前, 国内10.6μm λ/4波片的研究工作还是空白。

本文着重讨论了用于10.6μm的CO₂激光器的90°位相延迟器(即λ/4波片)。利用单维搜索法及约束Powell优化法进行了设计, 同时选取了相应的材料, 自制了反射率及圆偏振测量装置, 对制备的样品进行了测量, 并对测量结果进行了理论分析。

二、圆偏振理论及膜系设计

1. 圆偏振光是由两个频率相同振动方向相垂直的光波迭加而成的。

合矢量末端的轨迹方程为一椭圆方程:

$$\frac{E_x^2}{a_1^2} + \frac{E_y^2}{a_2^2} - 2 \frac{E_x E_y}{a_1 a_2} \cos(\delta_2 - \delta_1) = \sin^2(\delta_2 - \delta_1) \quad (1)$$

当两光波位相差 $\Delta = \delta_2 - \delta_1 = \pm 90^\circ$

则(1)式可转化为标准椭圆方程

$$\frac{E_x^2}{a_1^2} + \frac{E_y^2}{a_2^2} = 1 \quad (2)$$

当两光波振幅 $a_1 = a_2 = a$, 则(2)式可变成圆的标准方程

$$E_x^2 + E_y^2 = a^2 \quad (3)$$

这就是产生圆偏振的两个基本条件。

2. 位相延迟器可以分为内反射(全反射)和外反射型两种。全反射型位相延迟器可以是未镀膜, 也可是镀单层或多层膜的, 它的优点是反射率可达100%, 这与设计的细节无关, 而且薄膜厚度对位相延迟的敏感性较低。缺点是晶体制造困难, 成本高, 且至少要镀二层增透膜。本文分析了以 45° 入射的 GaAs 三棱镜, 以 25.14° 或 65° 入射的 ZnSe 菲涅尔斜方棱镜, 及 $n = 1.509$ 的直角棱镜镀 $n_1 = 2.05$ 、 $d = 0.1\lambda$ 单层膜全反 $\lambda/4$ 波片的例子, 并给出相应的设计公式。指出外反射位相延迟器才是今后发展的方向。

3. 在高反基底上镀透明膜可以设计出 90° 位相延迟膜, 设计公式如下:

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} \delta_0 = \frac{n_1}{n_0} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{2} \delta_1 - \phi_1 \right) \quad (4)$$

其中 n_0 、 n_1 是空气和透明膜的导纳, δ_1 是高反组合基底的位相差, ϕ_1 是透明膜的位相厚度。

从(4)式可知, 只要组合基底有足够的相移, 对确定的折射率可通过调节膜厚来满足位相差要求, 这样设计就是最外层厚度一维搜索过程, 非常简单, 控制也很容易。但位相差随最外层膜厚变化非常敏感, 难以镀制出优良产品。

4. 对于多层膜用矩阵法来计算:

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \left\{ \prod_j \begin{pmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

对于 P -偏振和 S -偏振, 膜层的位相厚度都是:

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

折射角由折射定律所确定, 即:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = \dots \quad (6)$$

导纳 η_j 由下式给出

$$\eta_j = \begin{cases} N_j / \cos \theta_j & P\text{-偏振波} \\ N_j \cdot \cos \theta_j & S\text{-偏振波} \end{cases} \quad (7)$$

设多层膜和基片的组合导纳为 $Y = C/B$

则

$$\text{反射率} \quad R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (8)$$

$$\text{反射相位} \quad \delta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{i \eta_0 (CB^* - BC^*)}{(\eta_0^2 BB^* - CC^*)} \right) \quad (9)$$

$$\Delta = \delta_r - \delta_i \quad (10)$$

我们利用 Powell 约束优化法, 它是一种单纯形加速法, 收敛比较快。其中评价函数为:

$$Z(n_i d_i) = W_1(\Delta_{\lambda_0} - 90^\circ)^2 + W_2(R_s - 1)^2 + W_3(R_s - 1)^2 + W_4(\Delta_{\lambda_0 \pm \Delta\lambda} - 90^\circ)^2 = Z_{min} \quad (11)$$

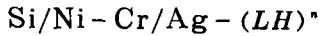
W_1, W_2, W_3, W_4 为权重因子 Δ_{λ_0} 是使用波长(例如 $10.6\mu\text{m}$)下的位相延迟, $\Delta_{\lambda_0 \pm \Delta\lambda}$ 是在 $10.6\mu\text{m}$ 附近两波长的位相延迟, 目的在于减少位相延迟对厚度的敏感性, 以便于镀制。

三、材料选择及制备过程

由于 CO_2 激光器波长很长, 很难制成全介质高反膜, 从分析可知, 介质膜不能同时满足位相延迟和反射率的要求, 所以选择反射率最高的银膜为底层膜, 考虑到激光光损伤阈值, 基底材料最好选择膨胀系数小、导热率高、热容量大的单晶硅。由于银膜和硅结合不好, 中间加Ni-Cr合金作为连结层, 以提高牢固度。

高折射率介质材料我们选取折射率高、吸收系数小、结合较牢固、吸潮量小的ZnSe。低折射率材料最好采用 ThF_4 , 但由于有放射性, 没有防护措施, 无法使用。我们选择 BaF_2 , 因为它吸收量小一些, 吸收系数也较小, 且和银结合较好。为了减小吸潮性, 提高牢固度, 改善结构, 我们掺杂了少量 SrF_2 和 CeF_3 。

考虑到底层为低折射率材料, 反射率较高, 其结构为:



通过计算得知, 这种膜系产生 90° 位相延迟最小介质层数为4层, 则上式 $n \geq 2$ 。

我们用GDM-450B型真空镀膜机镀制以银为金属膜加4层介质膜的位相延迟片, 用硫化铅作为接收器, 用多极次极值法控制, 为了减少误差, 采用预镀层、过正控制等技术。

四、测量结果及误差分析

我们用分光光度计法, 测算出ZnSe和 $\text{BaF}_2 + \text{SrF}_2 + \text{CeF}_3$ 的折射率分别为2.35和1.25; 利用麦克莱(Maclein)多次反射法, 自制了4次反射、 45° 角入射的反射率测量装置, 功率计为接收器, CO_2 激光器为光源, 测出反射率为 $95.7 \pm 0.7\%$, 和理论值相符。

测量圆偏振关键是要制作检偏器, 我们用

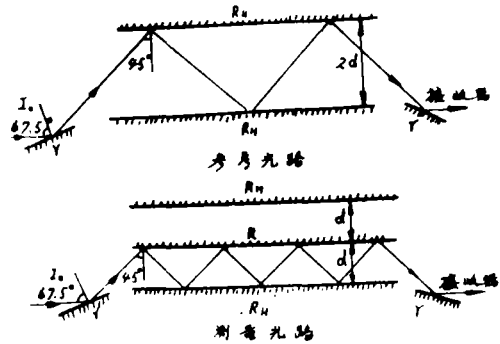


图1 45° 多次反射测量装置

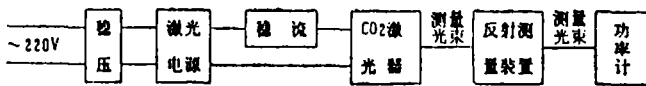


图2

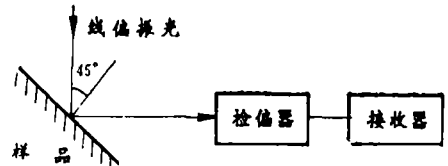


图4 圆偏振测量装置图



图3 检偏器

4片ZnSe的布氏角入射得到理论偏振比 $T_r/T_o = 0.004$,用带有布氏窗的CO₂激光器作为光源,以45°方位角、45°入射角入射到样品上,如图4所示。测出位相延迟($\Delta = 2 \text{ arc tge}$, e 为椭圆度)为 $79 \pm 2^\circ$ 。

通过分析可知,折射率的误差对位相延迟影响很大;膜厚控制误差对位相延迟小一些。在位相延迟测量入射角误差及激光器功率不稳,对测量结果影响也较大。

五、讨 论

由于90°位相延迟通常出现在 $\lambda/4$ 波堆截止区两侧,所以它与反射率有一定矛盾。因此反射率较低,这样激光损伤阈值也较低。只有用二片(或三片)反射镜,每片产生45°(或30°)位相延迟,这样反射率就会有很大提高,可以应用于实际。但也存在位相延迟随膜厚变化特别敏感的问题。另外,可用吸收系数小的ThF₄作为低折射率材料,镀制10层以上的金属及介质组合膜,以达到高反的目的。

参 考 文 献

- [1] W.H.Southwell, Appl.Opt., 18, 11(1979)1875
- [2] W.H.Southwell, Appl.Opt., 19, 16(1980)2688
- [3] Joseph H.Apfel, Appl.Opt., 20, 6(1981)1024
- [4] Joseph H.Apfel, Appl.Opt., 21, 4(1982)733
- [5] Joseph H.Apfel, Appl.Opt., 23, 8(1984)1178
- [6] Eberhard Spiller, Appl.Opt., 23, 20(1984)3544
- [7] 顾培夫, 唐晋发, 仪器仪表学报, (1985), 6, No.1, 91

Preparation of Thin Films Quarterwave Plate Used in High Power CO₂ Laser and Preliminary Study of Thin Films Retardation

Chu Guoqiang

Abstract

Quarterwave plate as a light beam average component, is a key component in high power CO₂ laser processing machine. At oblique incidence the multilayer reflectors, including internal and external reflections, have different phase shifts for the two planes of polarization. Therefore the design of reflectors with specific phase shift have been carried out by computer optimization. The purpose of this paper is to design coating with the relative difference of phase shifts of 90° at 10.6 μ m. The reflectors with the phase difference of 90° will act as a quarterwave plate. Some advantages over bulk quarterwave plates

are that they may be used for any wavelength, may have higher precision of phase shift difference and large apertures. The two design methods, experimental techniques, results and errors analysis are presented.