

宽带多层高反射膜相位色散的干涉法测量

沃敏政 梁培辉 张峭峰 王之江
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

在超短脉冲技术中,腔内元件的相位色散效应起了重要影响,本文介绍了一个测定宽带多层高反射膜的相位色散的实验方法,同时计算了反射膜的相位二阶导数,实验表明宽带多层反射膜相移和相位二阶导数与膜层设计和工艺过程有密切关系。

一、引 言

用锁模技术来获得超短脉冲,可使激光脉冲宽度达到 ps 甚至 sps 量级。采用环形腔对撞锁模技术,使脉冲宽度进一步压缩到小于 100 fs^[1,2]。在探究限制脉冲宽度压缩的原因中,腔内的光程色散效应越来越引起人们的重视。在对撞锁模环形腔中引起光程色散的元件有激光染料、吸收染料和介质膜。有人在腔内插入一定厚度的玻璃、石英等负色散材料,部分补偿腔内元件的正色散。然而要完全补偿光程色散,尤其是在宽光谱锁定时,必须研究各种色散元件的频谱特性。多层介质膜的反射相位特性也极为人们所重视。有人用传统的矩阵理论对 $\lambda/4$ 膜系的多层介质膜进行过计算。但是介质膜的反射特性在很大程度上取决于制作工艺,尤其是宽带介质膜,相位特性与制作过程关系更为密切。本文作者之一,曾计算了四种膜系的相位延迟色散^[3]。不同的膜层引起的反射相位二阶导数有较大的差别,可正可负。因此可望利用介质膜的反射相位特性更完善地补偿色散元件引起的相位色散效应,进一步压缩脉冲宽度。

假设激光在介质膜上的反射相位随 ν 是慢变化的。

$$\phi(\nu) = \phi(\nu_0) \cdot \left(\frac{d\phi}{d\nu}\right)_{\nu_0} (\nu - \nu_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2\phi}{d\nu^2}\right)_{\nu_0} (\nu - \nu_0)^2. \quad (1)$$

考虑到 $\phi(\nu_0)$ 和 $\left(\frac{d\phi}{d\nu}\right)_{\nu_0}$ 只影响到相移和脉冲包迹的最大值在时间上的移动,对脉冲形状的影响主要是二阶导数项 $\frac{d^2\phi}{d\nu^2}$ 。

估计这二阶导数对脉冲宽度的影响。如果输入激光脉冲的时间分布是高斯型,脉冲宽度为 τ_{in} 。

$$E_{in} = E_0 \exp[-(2 \ln 2)t^2/\tau_{in}^2] \cdot \exp(i2\pi\nu t). \quad (2)$$

经过多层介质膜反射之后,由于多层膜的相位色散效应使脉冲展宽为 τ_{out}

$$\frac{\tau_{out}}{\tau_{in}} = \left(1 + \frac{\phi'''}{4\beta^2}\right)^{1/2}, \quad (3)$$

其中

收稿日期: 1985年10月22日

$$\beta = 2\pi r_{in}^2 / (8 \ln^2). \quad (4)$$

介质膜反射相位色散及其二阶导数特性的实验测定对脉冲形状是至关重要的。但至今未见有关测量方法的实验。本文介绍了一种用干涉法测量多层反射膜在正入射情况下的反射相位色散的实验方案,并用数据处理求得了介质膜反射相位对入射光频率的二阶导数 $d^2\phi/d\nu^2$ 。

二、测量原理和实验装置

图 1 是测量多层反射膜相位色散的实验光路图。光路中的 F-P 干涉仪是由两块镀有待测多层介质膜的高反射镜组成,间距 $d = 99 \mu\text{m}$,自由光谱范围为 $\Delta\lambda = \lambda^2/2d$,在 6000 \AA 附近 $\Delta\lambda$ 约为 18 \AA 。透过 F-P 干涉仪的光强为

$$I^{(t)} = I^{(i)} \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}. \quad (5)$$

δ 是透过光强的相位因子。在正入射情况下考虑到多层介质膜反射时的相位移动

$$\delta = \frac{4\pi\nu}{c} \cdot d + \phi(\nu), \quad (6)$$

$\phi(\nu)$ 就是介质膜的相位函数。当频率满足 $\delta = 2m\pi$ 时,干涉仪的透过率最大。透过的光束经透镜 L_2 聚焦在光栅光谱仪的入射狭缝上。用光谱干板记录 F-P 干涉仪各级最大透射的谱。为准确定标各级谱的位置,在谱板上同时记录 He-Ne 光源的光谱线用作定标。

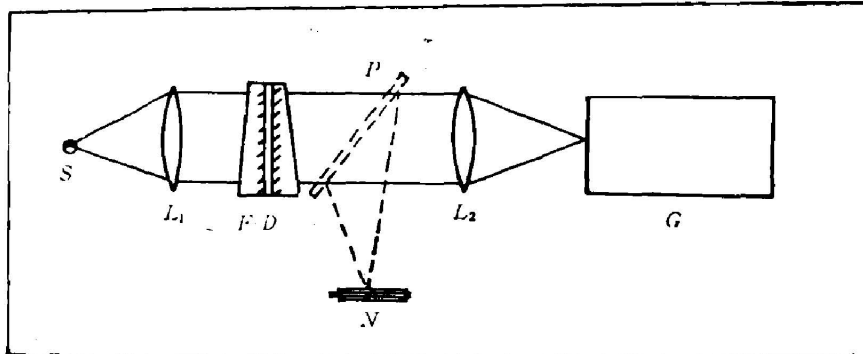


Fig. 1 Schematic of the experimental setup determining the reflective phase dispersion of the dielectric coating

S—white point light source; L_1 —condensing lens; P—movable glass plate; F-P—Fabry-Perot interferometer; L_2 —lens; G—grating spectroscopy; N—He-Ne laser tube

由(6)式可知相邻二级透射谱之间的相对反射相移为

$$\phi(\nu_1) - \phi(\nu_2) = 2\pi + \frac{4\pi d}{c}(\nu_2 - \nu_1) \quad (7)$$

或写成一般的形式

$$\phi(\nu) = 2m\pi - \frac{4\pi d}{c} \nu. \quad (8)$$

测量各级谱的频率位置,就可得到反射相位随频率变化的关系。

三、实验结果

我们测量的多层宽带介质膜是两个 $\lambda/4$ 膜系相迭而成的,两个膜系的中心波长分别为 5100 \AA 和 6100 \AA 。膜层由 $40.95[H(LH)^7]L1.24[H(LH)^7]G$ 构成多层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 的宽带高反射膜。用 Perkin-Elmer Lambda-9 分光光度计测量该膜层的透过率,如图 3 所示。在 6060 \AA 、 6550 \AA 有两个透过小峰。整个高反射波段为 $4460 \text{ \AA} \sim 7000 \text{ \AA}$ 。我们的实验测量了 $5900 \sim 6900 \text{ \AA}$ 范围内的反射相位特性。用我们研究所自制的高反射率测量仪在该波段内测量了该膜的反射率曲线,如图 2 所示。

图 4 是各级透射光强的谱及定标线的照片。测量各级谱的频率位置,得到反射相位随频率变化的曲线,如图 5 所示。从图 5 可

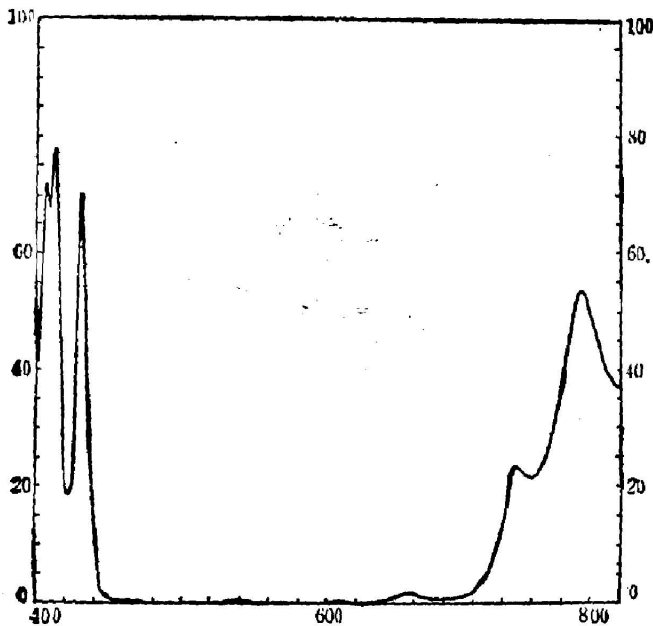


Fig.3 Transmissivity of the multi-layer dielectric coating

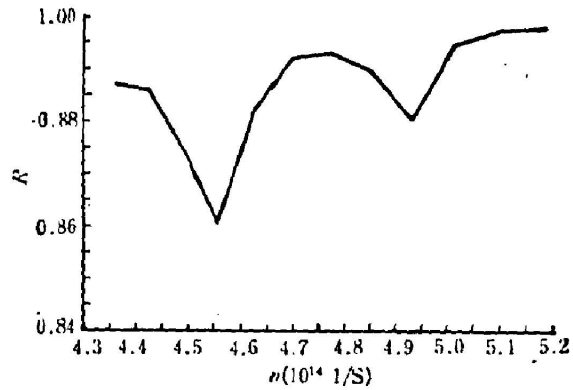


Fig.2 Reflectivity curve of the multi-layer dielectric coating

见反射膜的反射相位随频率增加而增加。

对(6)式求二阶导数

$$\frac{d^2\delta}{d\nu^2} = \frac{d^2\phi(\nu)}{d\nu^2}, \quad (9)$$

反射相位的二阶导数就是所测的透射光强相位因子的二阶导数。用实验测量 F-P 干涉仪的各级透射光的频率数据送入计算机,进行数字运算和数据光滑化处理,得到相位的二阶导数与 ν 的关系,如图 6 所示。相应于介质膜的透过小峰处,反射相位的二阶导数数量级在 10^{-26} sec^2 左右。由(3)式来估计二阶导数对脉冲宽度的影响,假设高斯分布的脉冲宽度 $\tau_{10} = 100 \text{ fs}$ 。相位二次导数取 $1.5 \times 10^{-26} \text{ sec}^2$,激光经过一

次反射后,脉冲宽度将展宽 1.2 倍。以上只是以平均的二阶导数来估计。根据实际 $d^2\phi/d\nu^2$ 的频谱特性,将会对输入脉冲进一步调制,使脉冲变形。随着脉冲中心频率不同,脉冲波形



Fig. 4 Multi-order transmissive spectra from the F-P interferometer which consists of a pair of the coatings

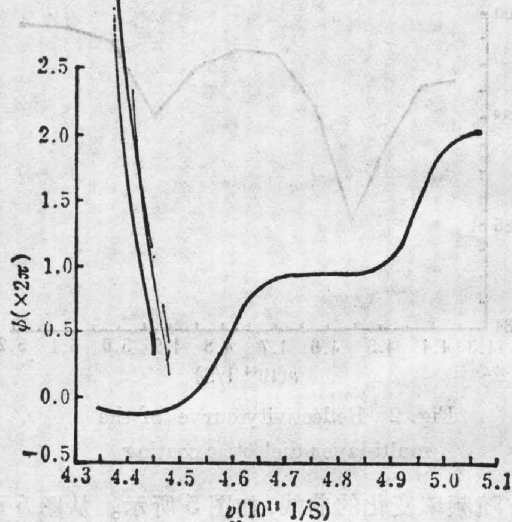


Fig. 5 Dependence of reflective phase shift on frequency for the reflective coating

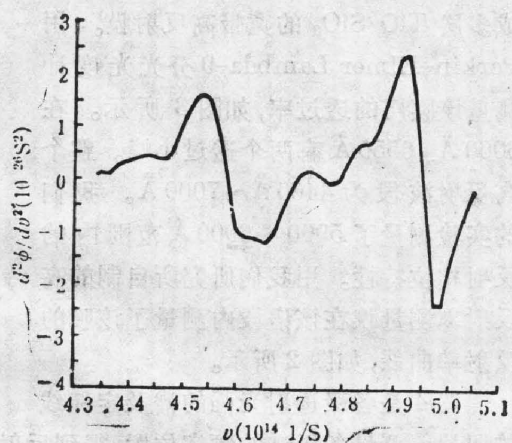


Fig. 6 Dependence of phase second derivative on frequency for the reflective coating

也不同。

由(3)式可知,在相位非线性色散的情况下,脉冲加宽是相位二阶导数的偶函数,因此无论相位二阶导数取正、取负都同样会引起脉冲的加宽和变形。要使 $d^2\phi/d\nu^2$ 变小,需将相移曲线在脉冲所占的整个频段内尽可能平缓。选择最佳的膜层设计和适当控制镀膜工艺,就有可能实现让膜层的相位色散来补偿腔内其他色散元件引起的相位色散,使 $\left| \frac{d^2P}{d\nu^2} \right|$ 取最小值,实现时域中脉冲进一步的压缩。

实验中 F-P 干涉仪需要精心调整,使其反射面与摄谱仪光轴准直。摄谱仪入射狭缝位于 L_2 的焦面上,如果 F-P 干涉仪的反射面与仪器光轴不准直,那么,将只有 F-P 干涉仪中倾斜光束才能进入摄谱仪。透过 F-P 干涉仪光束的相位因子变为

$$\delta = \frac{4\pi d \cos \theta}{c} \cdot \nu + \phi(\nu), \quad (10)$$

最大透过率的各级谱就会因此位移。如果上下倾斜,通过 L_2 聚焦在狭缝不同高度的透射极大的波长就不同,表现为各级谱的谱线是倾斜的。调整 F-P 干涉仪的俯仰角可使谱线是垂直的。如果左右有偏转,谱线的位置就会向短波长方向移动。左右转动 F-P 使谱线移到最长波长位置,以此来校正水平方向的偏转。

实验是通过测量 F-P 干涉仪各级次透射光的位置来确定多层膜反射相移的。因此各级谱线的定位准确度决定了测定相移的精度。

通过显微密度计在 X-Y 记录仪上绘出谱线的黑度曲线。测量谱线的频率位置的准确度主要取决于谱线轮廓的宽度和形状。谱线的倾斜,引起测量时轮廓的变形, F-P 干涉仪两表面的平面度限制了谱线细度的上限值。本实验测得的相位精度 $\Delta\phi/2\pi \sim 1\%$ 。

四、结 论

实验测量了多层宽带反射膜的反射相位色散特性并计算了相应的相位二阶导数。与 [1, 2] 计算的二阶导数值相比较,实验值要大两个数量级。这是因为所计算的模型是简单的 $\lambda/4$ 膜系,反射曲线都是理想化的。而我们测量的膜是由两组 $\lambda/4$ 膜系相迭而成,反射曲线在整个反射带内并非全是平坦的,而是在 6060 Å 和 6550 Å 处有两个透射小峰。在反射率有变化的谱段,相位往往有很大变化。相位的二阶导数就会有较大的值。由图 6 可以看到相应于 6060 Å 透过小峰的上升沿和下降沿处,即在 6012 Å 和 6091 Å 处,其相位二阶导数的值分别为 $-2.4 \times 10^{-26} \text{s}^2$ 和 $2.3 \times 10^{-26} \text{s}^2$ 。相应于 6550 Å 透过小峰的上升沿和下降沿处,即在 6466 Å 和 6612 Å 处,其相位二阶导数的值分别为 $-1.2 \times 10^{-26} \text{s}^2$ 和 $1.6 \times 10^{-26} \text{s}^2$ 。由实验可见,反射膜(尤其是宽带反射膜)的相位色散特性与膜层设计和镀膜工艺有密切关系。在反射率不平坦区,相位色散并非单调变化。相位二次导数可有较大的变化。

本实验工作得到所内有关同志的大力支持。镀膜组杨本祺、葛建忠等同志为我们提供了测试的宽带反射膜;张伟清、何朝玲、陈莉娜等同志帮我们对膜层的透射率、反射率和谱线进行精心测试,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] W. Dietel *et al.*; *Optics Comm.*, 1984, **50**, No. 3 (Jun), 9.
- [2] Sandro de Silvestri *et al.*; *IEEE JQE*, 1984, **QE-20**, No. 5 (May), 533.
- [3] 王之江, 杨本祺;《光学学报》, 1985, **5**, No. 8 (Aug), 697.
- [4] M. 玻恩, E. 沃耳夫著;《光学原理》, (杨荫荪等译校, 科学出版社, 1978), 429.

Measurement of the phase dispersion of wide-band multi-layer high reflective coatings by using multi-beam interference

WO MINGZHENG, LIANG PEIHUI, ZHANG SHAOFONG AND WANG ZHUIJIANG
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 23 October 1985)

Abstract

The phase dispersion effect of intercavity elements plays an important role in the femto-second technique. This paper describes an experimental method for measuring the phase dispersion of multi-layer wide band high reflective dielectric coatings by means of multi-beam interference. The phase second derivative of reflective coatings is calculated. Experimental results show that the phase shift and the phase second derivative are closely related to the manufacturing process and design of the wide band multi-layer reflective coating.