

单层介质膜保偏全反射直角三棱镜镀膜材料的选择及其微分相位特性研究

孙伟民 王政平 阮顺龄 黄宗军 康 崇 张树全
(哈尔滨工程大学物理系, 哈尔滨 150001)

摘 要 入射角、基底玻璃折射率、膜介质折射率、膜厚等因素会影响单层介质膜保偏全反射直角三棱镜的保偏特性, 且各因素的影响程度并不相同。本文分析了上述各因素的微小变化对保偏特性的影响, 并提出了选择膜介质的方法。

关键词 薄膜, 棱镜, 保偏全反射, 微分相位特性。

1 引 言

保偏反射技术广泛地应用于光线转向器件^[1]、光线平移器件^[2]、光学传感器^[3]等方面, 而利用镀膜方法制成的保偏全反射棱镜正是这样一种实现保偏反射的器件。薄膜光学形成于本世纪六十年代^[4], 当时主要集中于振幅特性的研究, 如研制增反、增透膜等。随着激光光学和偏振光学的发展, 人们开始了对薄膜偏振特性的研究^[5, 6]。近年来, 此研究十分活跃, 但多以讨论如何实现保偏反射为主, 而对各种相关因素与理想值发生偏离时会对镀膜器件的保偏特性有何影响讨论很少, 且仅限于对个别因素的讨论^[1, 2], 缺乏对各个因素影响的综合分析。本文将讨论单层介质膜保偏全反射直角三棱镜的设计方法及其微分相位特性。

本文利用棱镜反射光中相互垂直的两个分量 (p 、 s 分量) 间的相位差与几个相关因素(入射角、基底玻璃折射率、膜介质折射率、膜厚等) 的关系, 说明可以通过合理选择各因素制成单层介质膜保偏全反射直角三棱镜, 并提出了选择膜介质材料的原则方法。本文还采用数值计算的方法给出了 p 、 s 分量之间的相位差对几个因素的偏导数, 进而讨论了各因素对棱镜保偏特性影响的大小。

2 基本理论

根据菲涅耳公式, 光在 0、1 两介质表面的复反射率为

$$\begin{aligned} r_p &= (n_1 \cos \theta - n_0 \cos \theta_1) / (n_1 \cos \theta + n_0 \cos \theta_1) \\ r_s &= (n_0 \cos \theta - n_1 \cos \theta_1) / (n_0 \cos \theta + n_1 \cos \theta_1) \end{aligned} \quad (1)$$

这里, n_0 、 n_1 分别为 0、1 介质折射率, θ 、 θ_1 分别为入射角和折射角。

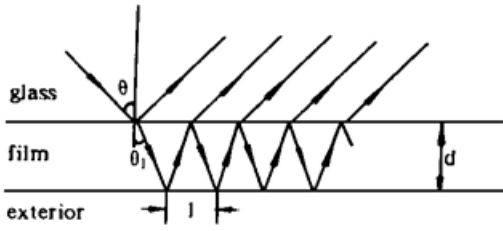


Fig. 1 Schematic diagram of multi-reflection

在基底玻璃-膜介质-外界介质系统中, 当光在玻璃内以 θ 角入射后, 将在介质的上下表面来回反射, 各次反射的反射光将发生干涉(图 1), 如在反射光束范围内反射次数足够多, 则可导出 p 、 s 分量的复反射率为^[7]

$$R_p = [r_{pgf} + r_{pfe} \exp(-i2\beta)] / [1 + r_{pgf}r_{pfe} \exp(-i2\beta)]$$

$$R_s = [r_{sgf} + r_{sfe} \exp(-i2\beta)] / [1 + r_{sgf}r_{sfe} \exp(-i2\beta)]$$

(2)

R_p 、 R_s 分别为 p 、 s 分量的复反射率, r_{pgf} 、 r_{sgf} 分别为在基底玻璃和膜介质之间的 p 分量和 s 分量的复反射率, r_{pfe} 、 r_{sfe} 分别为在膜介质和外界介质之间的 p 分量和 s 分量的复反射率。且

$$\beta = 2\pi(d/\lambda) \sqrt{n_f^2 - n_g^2 \sin^2 \theta}$$

(3)

这里, n_g 、 n_f 分别为基底玻璃和膜介质的折射率, d 为膜厚, λ 为入射光波长, 由(3)式可知, d/λ 是作为一个整体对复反射率产生影响的, 因此用膜厚波长比 $q = d/\lambda$ 来代替膜厚的讨论。

本文讨论的是单层镀膜的情况, 外界介质取为真空或空气 ($n_e \approx 1$)。

从图 1 可以看出, 在每两次反射中, 反射点会移动 $l = 2d \tan \theta_1$ 。而(2)式的适用条件是反射次数极多, 且反射点移动不大。如果 d 和 θ_1 值过大, 造成两次反射间反射点移动过大, (2)式成立的条件将不再满足。(2)式中 R_p 、 R_s 均为复数, 将其模记作 $|R_p|$ 、 $|R_s|$, 而将其幅角(相移)记作 δ_p 、 δ_s , 并将反射时引入的 p 、 s 光的相位差记作 $\delta = \delta_p - \delta_s$ 。

由(1) - (3)式可以看出 δ 是 n_g 、 n_f 、 θ 、 q 的函数, 当 n_g 、 n_f 、 θ 、 q 选择合适时, 则可实现保偏全反射, 即 $|R_p| = |R_s| = 1$, $\delta = 0$ 。而当这些因素发生微小变化时, 将对 δ 带来不同程度的影响。本文采用的研究方法为: 先选定 n_g 、 θ , 再由不同的 n_f 选择合适的 q 值来实现保偏全反射, 并给出在 $\delta = 0$ 处的 δ 对 n_g 、 n_f 、 θ 、 q 的偏导数, 进而讨论在 $\delta = 0$ 附近区域内 δ 随 n_g 、 n_f 、 θ 、 q 微小变动而改变的情况, 给出了保偏全反射直角三棱镜的微分相位特性。

3 镀膜材料的选择

本文从实用的角度出发选择直角三棱镜作为研究对象, 选择入射角 $\theta = 45^\circ$ (图 2)。由斯奈耳定律 $n_g \sin \theta = n_f \sin \theta_1 = n_e \sin \theta_e$ 知, 为了实现全反射, 需使 $n_g \geq n_e / \sin \theta$ 。

当 θ 和 n_g 选定以后, 对 n_f 的选择则需要受四方面的限制:

1) 为了避免在基底和膜之间发生全反射, 需要使 $n_f \geq n_g \sin \theta$ 。

2) 为满足 $\delta = 0$, 又要求 n_f 不能太大。选 $n_g = 1.900$, $n_f = 1.350$ 、 1.440 、 1.451 、 1.500 , 计算出 δ 与 q 的关系曲线如图 3。从图 3 可以看出, 当 n_f 选择合适时, δ 会有一系列零点; 而当 n_f 超过某一定值时 δ 则会没有零点。研究发现, 对每种折射率为 n_g 的基底玻璃, 均存在一个特定的膜介质折射率 n_{fc} , 使得 $n_f > n_{fc}$ 时, δ 没有零点, 从而无法实现保偏反射的目的。在下文中称 n_{fc} 为临界膜折射率。

3) 通常, 膜厚的控制较为困难, $q = d/\lambda$ 的精度仅能控制在 $1/10$ 左右, 因而应选择 δ 对

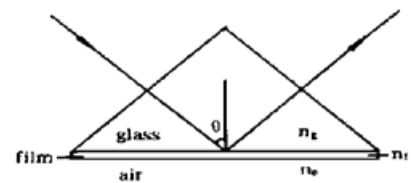


Fig. 2 Schematic diagram of a right triangular prism

q 变化不敏感的 n_f 。由图 3 可以看出, 当 $n_f = n_{fc} = 1.451$ 时, 曲线 3 与 $\delta = 0$ 轴相切, $\partial\delta/\partial q = 0$, 但此时仅在零点附近较小范围内满足 $|\delta| \leq \delta_{\max}$ (此处 $\delta_{\max} = 0.05 \text{ rad}$)。若取 n_f 略小于 n_{fc} , 例如 $n_f = 1.440$, 则在 $q_1 \leq q \leq q_2$ 范围内, 均可以满足 $|\delta| \leq \delta_{\max}$, 该范围大约是前者的 1.5 倍, 对膜厚控制的精度要求有所降低。

4) 选择 n_f 时还要注意满足(2)式成立的条件, 即控制 d 和 θ_1 的值不过大。例如, 当 $n_f = 1.350$ 时, 虽然在第二个零点处曲线较平坦, 但这时 $q \approx 2$, 取光波长 $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$, 则膜厚 $d = 1.2 \mu\text{m}$, 而此时 $\theta_1 = 84.4^\circ$, 反射 200 次后反射点会移动 $L = 100l = 200d \tan \theta_1 = 2.45 \text{ mm}$, 这已移出光斑直径了, (2) 式的适用条件不再满足, 因而对这个零点不予考虑。

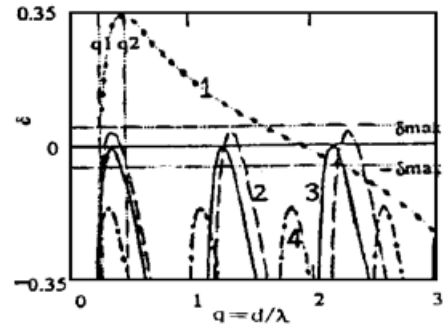


Fig. 3 δ as a function of q (1: $n_f = 1.350$, 2: $n_f = 1.440$, 3: $n_f = 1.451$, 4: $n_f = 1.500$)

4 保偏全反射直角三棱镜微分相位特性的研究

本文在选定入射角 $\theta = 45^\circ$ 、基底玻璃折射率 $n_g = 1.70, 1.80, 1.90$, 膜介质折射率 n_f 在合适的范围内、而取 q 为使 $\delta = 0$ 的最小膜厚波长比后, 利用数值方法计算了 δ 对 n_g, n_f, θ, a 的偏导数, 给出了该种棱镜的微分相位特性(见图 4)。

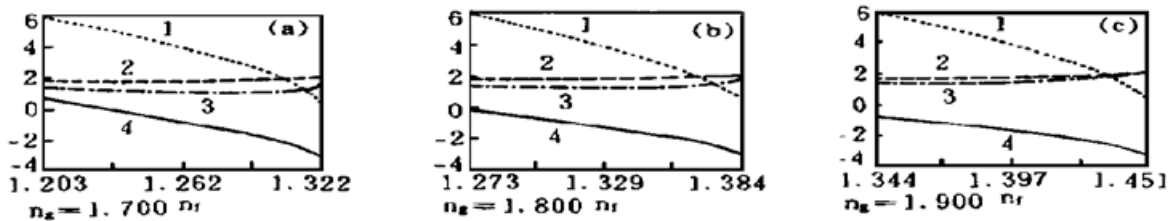


Fig. 4 Differential phase characters of a prism for (a) $n_g = 1.70$, (b) $n_g = 1.80$, (c) $n_g = 1.90$ (1: $\partial\delta/\partial q$; 2: $\partial\delta/\partial n_g$; 3: $\partial\delta/\partial\theta$; 4: $\partial\delta/\partial n_f$)

图 4 中, n_f 值均由可以实现保偏的最小值 $n_g \sin \theta$ 取到 n_{fc} (以 $n_g = 1.900$ 为例, $n_{fc} = 1.4512$, 本文取到 1.451)。由图 4 可以看出, 对不同折射率 n_g 的基底玻璃, 棱镜微分相位特性随 n_f 变化曲线形状类似, 且具有如下特点: δ 对 θ 和 n_g 的偏导数随 n_f 的变化改变不大, 在 n_f 的整个可选范围内基本平坦, 仅在 n_f 接近 n_{fc} 时曲线略有上扬。 δ 对 q 的偏导数随 n_f 的增大呈单调减小的趋势, 即随 n_f 的增大, δ 对 q 的改变越来越不敏感。 δ 对 n_f 的偏导数基本上为负值, 且其绝对值随 n_f 的增大而增大, 即 δ 对 n_f 变化的敏感性随 n_f 增加而增加。由于 δ 对 θ 和 n_g 的偏导数对 n_f 的变化不敏感, 而且入射角可以通过仔细加工玻璃基底和认真调整光路将其偏差降得很小, 基底玻璃的折射率与镀膜过程无关, 可以在镀膜前进行精确测量, 因此在选择膜介质时可不考虑 θ 和 n_g 的影响。 δ 对 q 和 n_f 的偏导数对 n_f 的变化均很敏感, 而且 δ 对二者微小变化的敏感性随 n_f 改变的趋势基本相反。另外, 膜厚的精确控制一般较为困难, 而膜介质的折射率与镀膜工艺有关, 二者均可能有较大的偏差, 因而在选择膜介质时应综合考虑 δ 对 q 和 n_f 偏导数的值。

在膜厚控制较为困难时, 应选择折射率 n_f 接近 n_{fc} 的膜介质。由图 4 知, 此时 $\partial\delta/\partial\theta \approx 2$, $\partial\delta/\partial n_g \approx 2$, $\partial\delta/\partial q \approx 0.5$, $\partial\delta/\partial n_f \approx -3$ 。当这些因素与理想值发生微小偏离时, 膜介质折射率的影响最大, 入射角和基底玻璃折射率的影响次之, 膜厚波长比的影响最小。为减小膜介质

折射率变化的影响, 应选择折射率受镀膜工艺影响较小的膜材料, 并在制作保偏棱镜前对其折射率随镀膜工艺的变化规律进行研究。

结 论 1) 当合理选择入射角、基底玻璃折射率、膜介质折射率和膜厚波长比等因素后, 可以制成单层介质膜保偏全反射直角三棱镜。而当各因素偏离理想值时, 会对棱镜的保偏特性产生不同程度的影响。

2) 当选定入射角和基底玻璃材料以后, 只有折射率在一定范围内的膜材料可以用来制作这种棱镜。而且可供选择的膜材料的折射率存在一个上限——临界膜折射率, 从实际镀膜工艺考虑, 应选择折射率略小于临界膜折射率的膜材料。

3) 在如上选择膜介质以后, 膜介质折射率的变化对该种棱镜的保偏特性影响最大, 应选择折射率随镀膜工艺影响较小的膜材料, 并事先研究其折射率随镀膜工艺变化的规律。

参 考 文 献

- [1] Mordechai Gilo, Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube. *Appl. Opt.*, 1992, **31** (25) : 5345~ 5349
- [2] R. M. A. Azzam, M. Emdadur Rahman Khan, Polarization-preserving single-layer-coated beam displacers and axicons. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(18) : 3314~ 3322
- [3] K. B. Rochford, A. H. Rose, M. N. Decter *et al.*, Faraday effect current sensor with improved sensitivity-bandwidth product. *Proc. SPIE*, 1994, **2360** : 32~ 35
- [4] F. Abeles, Chapter 5: Optics of Thin Films. in *Advanced optical techniques*, ed. A. C. S. van Heel, North-Holland, Amsterdam, 1967
- [5] J. H. Apfel, Graphics in optical coating design. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(6) : 1303~ 1312
- [6] A. Thelen, Nonpolarizing interference films inside a glass cube. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12) : 2983~ 2985
- [7] R. M. A. 阿查姆, N. M. 巴夏拉著, 梁民基, 尹树百, 张福如等译, 椭圆偏振光测量术和偏振光, 北京: 科学出版社, 1986年11月第一版, 180

Choice of Film Materials and Differential Phase Characters of Polarization-Preserving Totally-Reflecting Prisms with a Single Medium Layer

Sun Weimin Wang Zhengping Ruan Shunling

Huang Zongjun Kang Cong Zhang Shuquan

(Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(Received 6 June 1996)

Abstract The incident angle, refractive indices of the glass and the film, and thickness of the film can influence the polarization-preserving characters of polarization-preserving totally-reflecting prisms with a single medium layer. The effects of small variances of these factors are analysed, and a method of choosing film materials is proposed.

Key words thin film, prism, polarization-preserving totally-reflection, differential phase character.