

直角棱镜的保偏反射膜设计及分析

李朝辉¹ 王 昭¹ 黄军辉¹ 齐静雅¹ 余 宝¹ 郭俊杰²

¹西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049

²陕西恒通智能机器有限公司, 陕西 西安 710049

摘要 光波经过光学位移反射器后,由于全反射的存在,入射光的s偏振分量和p偏振分量在相位上将产生一个额外的常量差值,这将导致出射光相对于入射光的偏振状态发生变化。通过分析高反膜的反射机理及其结构特征,同时结合直角棱镜的几何结构,提出了基于高反膜膜系结构的直角棱镜保偏膜设计方法,该方法通过将设计膜系镀制到直角棱镜的两直角面上,使光束经过直角棱镜平行反射后,偏振状态保持不变。同时,对该方法进行了可行性研究和误差分析。结果表明,该方法结合目前成熟的高反膜制作工艺,理论可行,易于实现商业化应用;对于光波的小角度入射误差而言,方案所述镀膜直角棱镜的保偏特性表现出良好的稳定性。

关键词 光学设计; 保偏膜; 干涉; 高反膜; 直角棱镜

中图分类号 TH741 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0316002

Design and Analysis of the Polarization-Preserving Films for Rectangular Prism

Li Zhaohui¹ Wang Zhao¹ Huang Junhui¹ Qi Jingya¹ Yu Bao¹ Guo Junjie²

¹School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

²Shaanxi Hengtong Intelligent Machines Co.,Ltd., Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract An extra constant difference between s and p component is produced after the light gets through the reflector based on total reflection, which lead to the change of the polarization state as a result. A novel design method of the polarization-preserving films for rectangular prism based on high-reflection films is proposed after deep analysis on its working mechanism and the geometry of the prism. The polarization state is kept invariant by plating the designed films on the two planes of the prism. The method has been theoretically and experimentally proved to be feasible. It is also easy to realize commercial application with the mature fabrication process of the high-reflection films. What's more, the polarization-preserving characteristic of the method works well with little incidence error.

Key words optical design; polarization-preserving films; interference; high-reflection films; rectangular prism

OSIC codes 120.5050; 220.4830; 230.5480; 310.5548

1 引 言

一般的光学反射位移器件,如角锥棱镜、直角棱镜等,都基于全反射原理实现光波折返,而由于全反射对光波相位的影响(称为相位损失),出射光的偏振状态较入射光发生了变化,使其在有保偏特性要求^[1]的应用场合受到限制。目前,针对光波保偏的方法有薄膜法^[2-8]和几何法^[9-11]。其中,薄膜法可分为介质膜保偏法和介质-金属膜保偏法。由于该方法需要对薄膜进行特殊设计,在薄膜结构和材料选择上都有严格的要求,

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-10-23

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04003071)

作者简介: 李朝辉(1989—),男,硕士研究生,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: manshuren@163.com

导师简介: 王 昭(1964—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事光电测量,光学信息处理等方面的研究。

E-mail: wangzhao@mail.xjtu.edu.cn

因而相应的镀制工序复杂,工作量大;几何法从原理上分为两种,一种是通过转换入射光的s偏振分量和p偏振分量相对于入射面的空间位置,以抵消两分量的相位变化量^[9-10];另一种是基于多次全反射的相位差累加法^[11],使其累加和等于360°的整数倍以实现光波保偏,该方法主要用于光波传输需要改变一定角度的场合。几何法原理简单,但光学器件组合结构复杂,元件数量较多,不利于系统集成。本文基于直角棱镜的保偏特性需求,通过分析高反膜的反射机理,尤其是对光波相位的影响,提出了基于高反膜系的直角棱镜保偏膜设计方法,并从理论和实验上证明了方案的可行性和正确性。

2 高反膜反射机理分析

高反膜的反射机理是基于光波的相长干涉,如图1所示,反射光 R_1 、 R_2 、 R_3 等经各层界面反射后保持同相位,经反射后发生相长干涉,使反射光得到增强。下面将对其反射机理做进一步分析。

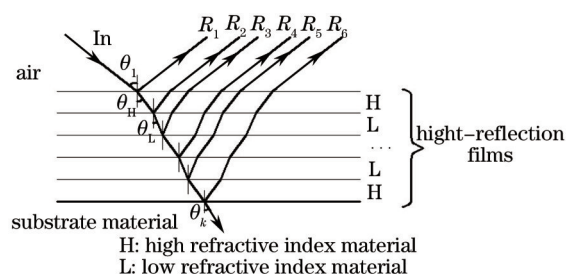


图1 高反膜模型

Fig.1 Model of high-reflection films

2.1 高反膜单层膜反射模型

以高折射率材料二氧化钛(H表示),低折射率材料二氧化硅(L表示)构成的高反膜为例;从单层膜分析高反膜的干涉机理,设高反膜设计的入射介质为空气,分析模型如图2所示分别对s偏振分量和p偏振分量进行分析。

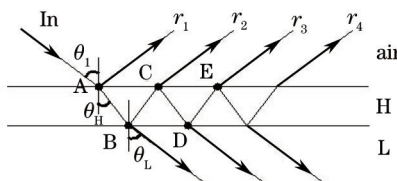


图2 高反膜单层膜反射模型

Fig.2 Model of single film in high-reflection films

2.1.1 s偏振分量

入射光从空气以 θ_1 入射H膜(入射角小于布儒斯特角),在入射点A发生部分反射,振幅反射比系数为 r_1 ,由菲涅耳公式^[12]可知,反射光 r_1 相对于入射光产生了 π 的相位变化量;基于高反膜的膜系结构,AB间引入的相位变化量为 $\pi/2$,之后透射光在B点发生反射,引入的相位变化量为0;同样BC段引入 $\pi/2$ 的相位变化量,经C点透射出去,整个过程引入的相位变化量为 $\pi/2 + \pi/2 = \pi$,即 r_2 与 r_1 保持同相位。依次类推,可知 r_3 与入射光同相位、 r_4 与 r_1 同相位,并如此交替下去。

则反射光振幅的计算公式可描述为

$$A_{s1}^r = |r_1|A^i + |r_2|A^i - |r_3|A^i + |r_4|A^i - |r_5|A^i \dots \quad (1)$$

由于 $|r_2| > |r_3|, |r_4| > |r_5| \dots$ 光波整体叠加结果保持与 r_1 同相位。即对于单层膜系的s偏振分量,反射光相对于入射光产生的相位变化量为 π 。

由薄膜特征矩阵^[13]可得s偏振分量经高反膜单层膜后的振幅反射比系数计算公式:

$$r_{s1} = \frac{n_1 n_L \cos \theta_1 \cos \theta_L - n_H^2 \cos^2 \theta_H}{n_1 n_L \cos \theta_1 \cos \theta_L + n_H^2 \cos^2 \theta_H} \quad (2)$$

将 $n_1 = 1, n_L = 1.457, n_H = 2.34, \theta_1 = \pi/4$ 代入(2)式可得 $r_{s1} = -0.6934$ 。即s偏振分量经高反膜单层膜作用后引入

了值为 π 的相位变化,与理论分析相符。

2.1.2 p 偏振分量

同理,可得 p 偏振分量的反射光振幅计算公式:

$$A_{p1}^r = |r_1|A^i + |r_2|A^i - |r_3|A^i + |r_4|A^i - |r_5|A^i \dots \quad (3)$$

光波整体叠加结果与 r_1 同相位。即对于单层膜系的 p 偏振分量,反射光相对于入射光产生的相位变化量为 0。

经薄膜特征矩阵计算可得 p 偏振分量振幅反射系数为 $r_{p1} = 0.4377$ 。即 p 偏振分量经高反膜单层膜作用后没有引入相位变化,与理论分析相符。

依次类推,对于多层高反膜系,可得到相同的结论,即对于 s 偏振分量和 p 偏振分量来说,各界面反射的光波分别具有相同的相位,可实现相长干涉。同时,s 偏振分量和 p 偏振分量产生的相位差为 $\Delta s - \Delta p = \pi$ 。基于此,当使用两相互垂直的平面反射镜实现光波平行折返时,s 偏振分量和 p 偏振分量的整体相位差为 2π ,即可实现光波保偏。

2.2 实验验证

为通过实验检验上述分析的正确性,拟借鉴文献[14]所述方案检验高反膜是否能消除相位损失,实验光路如图 3 所示,测量原理简述如下:测量光束在经过 1/2 波片后,所得测量信号相对于参考信号的相位差峰峰值为 360° ,当反射器存在相位损失时,其峰峰值将相应降低。图 3 所述反射器分别选取普通直角棱镜和两相互垂直的平面反射镜进行实验,同时以光束只经过 1/2 波片不经过反射器的实验数据为参考数据。实验数据如图 4 所示。

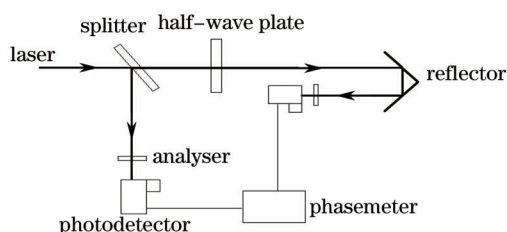


图 3 检测相位损失光路模型

Fig.3 Optical pathway for detecting phase loss

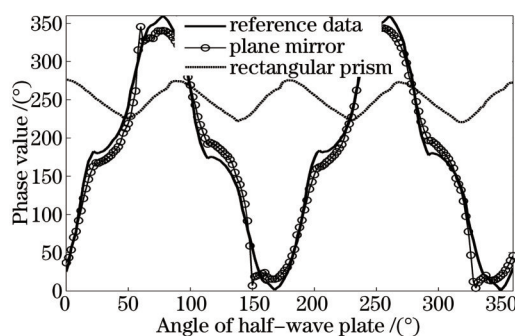


图 4 实验数据对比图

Fig.4 Comparison of experimental data

图 4 表明,使用平面反射镜的实验数据与参照数据具有很好的相符性,峰峰值相对饱满,较直角棱镜有了本质上的改变,从而验证了使用高反膜消除相位损失的可行性。

3 直角棱角的保偏反射膜

基于以上分析,提出将高反膜的反射机理应用到直角棱镜上,以高反膜相长干涉的反射机理代替直角棱镜的全反射机理;通过在其两直角面上镀高反膜,在满足高反射率要求的同时,实现保偏。棱镜镀膜模型如图 5 所示。

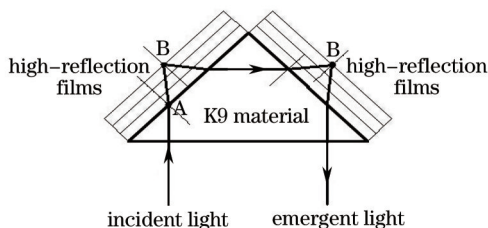


图 5 镀膜直角棱镜反射模型

Fig.5 Model of rectangular prism with films

光波在棱镜镀膜直角面上的两次反射中,入射面相互重合,即光波的s偏振分量和p偏振分量相对于入射面的空间位置没有发生变化,故而两次反射导致的两偏振分量的相位变化量可以实现累加;经过面1反射之后,s偏振分量的相位变化量为 $\delta_{s1} = \pi$,p偏振分量的相位变化量为 $\delta_{p1} = 0$;同理,经过面2反射之后,光波两偏振分量的相位变化量和面1一样。则s偏振分量和p偏振分量总的相位变化量分别为 $\Delta_s = 2\pi$ 和 $\Delta_p = 0$,满足光波保偏条件 $\Delta_p = \Delta_s + 2k\pi(k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots)$,同时有反射率 $|r_p| = |r_s| = 1$,从而保证光波在经过直角棱镜两次反射之后其偏振状态不发生变化。

需要指出的是,膜系设计所考虑的入射介质应该为直角棱镜的材料(这里以K9材料为例),而不是之前平面反射镜所对应的空气介质。倘若按照空气入射介质设计高反膜,会导致实际入射介质与理论不符,此时,介质膜的实际光学厚度将不满足 $nd \cos \theta = \lambda/4$,高反膜对光波相位的影响也将随之改变。

4 误差分析

4.1 末层全反射对反射相位的影响

由直角棱镜的几何结构可知,在其两直角面上镀高反膜,光波垂直棱镜斜面入射,并以 45° 的入射角从棱镜介质进入高反膜,与普通平板基底上的高反膜不同,在介质膜与空气的界面上(图5中B点位置),由于是高折射率材料入射低折射率材料,根据全反射的产生条件,表示为

$$\begin{cases} n_k \sin 45^\circ = n_H \sin \theta_H \\ \sin \theta_H \geq \sin \theta_c = 1/n_H \end{cases} \quad (4)$$

式中 $n_k = 1.5163$ 代表K9材料的折射率, $n_H = 2.34$ 代表材料的折射率, θ_H 为二氧化钛介质折射角, θ_c 为全反射临界角。

将上述参数带入(4)式可得 $1.072 > 1$ 恒成立,即在介质膜、空气界面将发生全反射。

由于高反膜系依旧存在全反射,理论上将引入额外的相位变化,因而有必要分析末层界面上的全反射对光波相位的影响。

设高反膜的镀制模型为 $\text{GH}(\text{LH})^m\text{A}$,其中G代表基底材料K9,H代表二氧化钛,L代表二氧化硅,A代表空气, m 为高反膜的周期层数。通过模拟计算可得p偏振分量和s偏振分量的相位变化量与变量 m 之间的关系如图6所示。

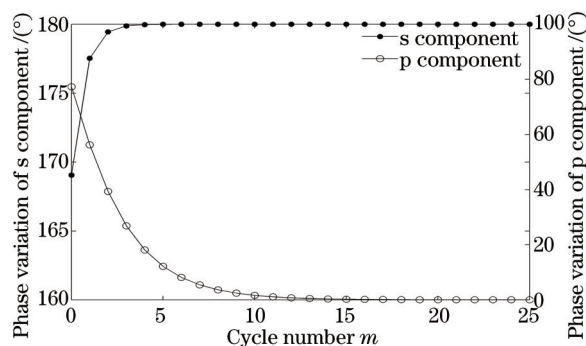


图6 s偏振分量和p偏振分量相位与膜层周期数关系图

Fig.6 Phase variation of s and p component versus cycle number

由图6可知:随着高反膜系周期层数的增加,末层全反射对两偏振分量的相位影响逐渐减弱并消失。s偏振分量的相位变化量趋于 180° ,p偏振分量趋于 0 ,与普通高反膜引起的相位变化量一致,也即,末层全反射对s偏振分量和p偏振分量相位的影响可以忽略。

该现象可以解释为:随着高反膜层数的增加,反射率不断增加,到达末层介质膜的光量越来越少,而全反射只存在于末层界面,其所占的光量比例较微弱,以致无法对反射光波的相位产生影响,其作用趋于 0 。

综上所述,高反膜末层界面全反射导致的相位变化取决于所镀膜层的周期数,当周期数大于10时其影响可忽略不计。

4.2 入射角误差对反射相位的影响

实际应用中,往往很难保证光波垂直入射棱镜斜面,当入射角偏离设计值时,通过高反膜的光程将不再是严格意义上的 $\lambda/4$;因而有必要对入射角误差引起的相位变化进行分析。

入射角存在误差对 s 偏振分量的相位影响如图 7 所示。

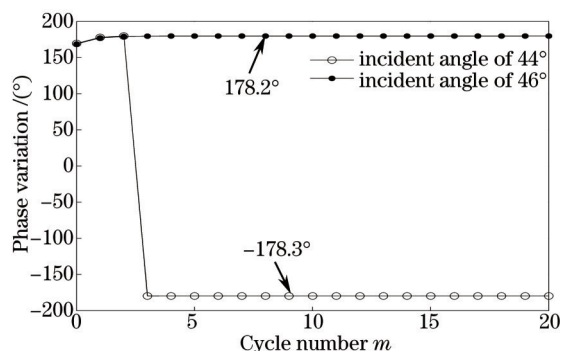


图 7 入射角误差对 s 偏振分量相位的影响

Fig.7 Effect of incidence error on phase of s component

图 7 表明,当入射角偏离设计值时,随着高反膜周期数的增加,s 偏振分量的相位变化量趋于定值,且该值偏离 180° 。光波 44° 入射时趋向 -178.3° , 46° 入射时趋向 178.2° ;二者绝对值相对于理论值均存在一定的误差。此外,由于直角棱镜的两直角面相互垂直,故而两入射角保持互余。在此情况下,s 偏振分量整体的相位变化量仅为 -0.1° 。

当入射角存在 $\pm 1^\circ$ 以内误差时,s 偏振分量的相位变化量如表 1 所示。

表 1 入射角与 s 偏振分量的相位变化量对应值

Table 1 Phase variation of s component under different incident angles

Incident angel/(°)	44.2	44.5	44.8	45	45.2	45.5	45.8
Phase value/(°)	-178.6	-179.1	-179.7	180	179.7	179.1	178.6

由表 1 可知,互余角对应的两次反射产生的相位变化基本相互抵消,其整体相位变化量很小,可以忽略。入射角存在误差对 p 偏振分量的相位影响如图 8 所示。

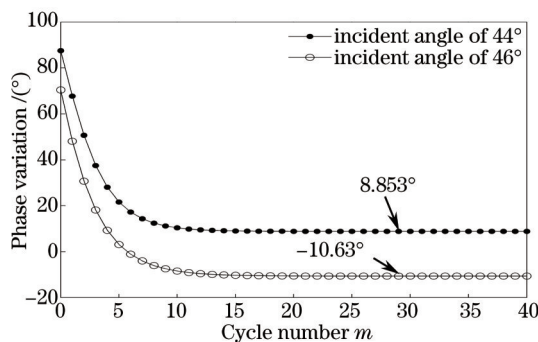


图 8 p 偏振分量入射角误差对相位的影响

Fig.8 Effect of incidence error of p component on phase

图 8 表明,随着高反膜层数的增加,p 偏振分量的相位变化量趋于稳定, 44° 入射时趋于 8.853° , 46° 入射时趋于 -10.63° ;与理论值有较大的偏差,同样,由于两次反射的入射角互余,p 偏振分量整体的相位变化量为 -1.777° ,与理论值相差不大。

当入射角存在 $\pm 1^\circ$ 以内误差时,p 偏振分量的相位变化量如表 2 所示。

表 2 入射角与 p 偏振分量的相位变化量对应值

Table 2 Phase variation of p component under different incident angles

Incident angel/(°)	44.2	44.5	44.8	45	45.2	45.5	45.8
Phase value/(°)	7.17	4.57	1.87	0	-1.94	-5	-8.29

以上分析表明:当实际入射角偏离设计值时,两偏振分量的相位变化量将从两个方向分别偏离 180° 和 0° ;且p偏振分量与s偏振分量对入射角误差的敏感度不同。同时,由于两次反射的入射角互余,实际两偏振分量的整体相位变化量较小,可以忽略。

5 结 论

针对直角棱镜在使用中存在相位损失的问题,通过分析高反膜的反射机理及结构特征,提出了基于高反膜膜系结构的直角棱镜保偏膜系设计方法,并从理论和实验上证明了该方法的可行性。同时对该方案进行了误差分析。结果表明,该膜系在保证光能量全反射的条件下,很好的解决了直角棱镜的相位损失问题,消除了其对光波偏振状态的影响;并且,该方案对棱镜的小角度位置误差不敏感。

参 考 文 献

- 1 Liu Zhongyao, Li Dejiao, Yin Chunyong, *et al.*. High precision roll angle interferometer[J]. Optical Technique, 2002, 28(4): 332-336.
柳忠尧, 林德教, 殷纯永, 等. 高精度滚转角干涉仪[J]. 光学技术, 2002, 28(4): 332-336.
- 2 V R Costich. Reduction of polarization effects in interference coating[J]. Appl Opt, 1970, 9(4): 866-870.
- 3 Se Il Park. Achromatic thin-film polarization-preserving beam displacers stable for thickness variations[J]. Appl Opt, 1991, 30(31): 4488-4490.
- 4 A Rahman, M Zaghoul, Mohamed S A Yousef. Unified analysis and mathematical representation of film-thickness behavior of film-substrate systems[J]. Appl Opt, 2006, 45(2): 235-264.
- 5 Li Gang, Sun Lianchun, Yu Zhaobo, *et al.*. Polarization effects in optical thin films[J]. Optics and Precision Engineering, 2003, 11(6): 647-651.
李 刚, 孙连春, 于兆波, 等. 光学薄膜中的偏振效应[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 647-651.
- 6 Z P Wang, W M Sun, S L Ruan. Polarization-preserving totally reflecting prisms with a single medium layer[J]. Appl Opt, 1997, 36(13): 2802-2806.
- 7 Jinhui Shi, Zhengping Wang, Zongjun Huang. Design and analysis of non-polarizing beam splitter in a glass cube[C]. SPIE, 2008, 7135: 71352.
- 8 R M A Azzam, M Emdadur Rahman Khan. Polarization-preserving single-layer-coated beam displacers and axicons[J]. Appl Opt, 1982, 21(18): 3314-3322.
- 9 A Chuan Hsu, ChengFang Ho, JyhLong Chern. Tilting tolerance analysis of a broadband polarization-preserving beam displacer[J]. Appl Opt, 2002, 41(28): 5956-5962.
- 10 Enrique J Galvez. Achromatic polarization-preserving beam displacer[J]. Opt Lett, 2001, 26(13): 971-973.
- 11 YiKai Cheng, JyhLong Chern. Polarization-preserving angular shifter[J]. Opt Society America, 2008, 25(7): 1558-1563.
- 12 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics Basics Tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 197.
郁道银, 谈恒英. 工程光学基础教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 197.
- 13 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 26.
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 26.
- 14 Wu ChienMing, Chuang YiTsung. Roll angular displacement measurement system with microradian accuracy[J]. Sensors Actuators A, 2004, 116(11): 145-149.

栏目编辑: 韩 峰