

文章编号: 1001-3806(2005)01-0101-03

ZrO₂ / SiO₂ 棱镜偏振膜的膜系优化设计与制备

沈自才, 孔伟金, 宋永香, 汤兆胜, 范正修*

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 对以 K9 玻璃为基底, 采用 ZrO₂ 和 SiO₂ 为高低膜料来制备棱镜偏振膜, 并进行膜系优化设计。设计指标为: 波长 540nm 处满足 $T_p > 99%$, $T_s < 1%$ 。优化结果表明, 膜系以 H3L(HL)¹³H3LH 为最佳膜系。测试结果表明, 此膜系完全满足设计指标, 偏振性能优良。探讨了参考波长对偏振膜工作带宽的影响。

关键词: 棱镜; 偏振膜; 优化; 带宽

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

The optimum design and preparation of ZrO₂ / SiO₂ polarizing film

SHEN Zi-cai, KONG Wei-jin, SONG Yong-xiang, TANG Zhao-sheng, FAN Zheng-xiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The polarizing prism film is optimized using K9 substrate and ZrO₂/SiO₂ thin film material. Designing aim is $T_p > 99%$ and $T_s < 1%$ at 540nm. The film of H3L(HL)¹³H3LH is best for the above design aim. The test shows that the film has excellent polarizing character. Then the influence of reference wavelength on polarizing film is discussed.

Key words prism; polarizing film; optimization bandwidth

引 言

在进行激光调制和激光隔离时, 常常需要把普通激光变成偏振光, 这时需要起偏元件。一般起偏器和检偏器用双折射晶体制成^[1, 2], 但随着激光工作的发展, 对偏振器的质量要求越来越高, 对偏振片的尺寸要求越来越大。这时, 仅仅依赖于晶体偏振器就比较困难, 为了适应这种要求可以采用薄膜偏振片。用介质膜堆构成的薄膜偏振分光镜因具有大口径、低损耗、系统设计灵活等优点而在光学技术领域得到了广泛应用^[3-5]。

目前, 物理气相沉积法镀膜常用材料为 MgF₂, SiO₂, ZrO₂, TiO₂ 和 HfO₂ 等, 笔者采用 ZrO₂ 和 SiO₂ 为膜料镀制棱镜偏振膜, 对膜系的最佳优化进行了系列探讨, 通过对膜系的优化, 制备出了较好的棱镜偏振膜, 并对其光学性能进行了测试。最后, 适当探讨了参考波长对偏振膜的性能的影响。

1 膜系设计

棱镜偏振分光镜通常是利用实现偏振条件的关系

式 $n_0 \sin \theta_0 = \frac{n_h n_l}{(n_h^2 + n_l^2)^{1/2}}$ 来设计, 此时入射角对两种

不同折射率材料的界面满足布儒斯特角, 这样 p 偏振光的反射完全消失。为了对两种不同材料满足布儒斯特角条件, p 偏振光的有效折射率必须相等, 即: $n_h / \cos \theta_h = n_l / \cos \theta_l$, 同时符合折射定律, 即: $n_h \sin \theta_h = n_l \sin \theta_l = n_0 \sin \theta_0$, 其中, θ_0 为偏振膜的入射角, θ_h 为射入高折射率膜料的折射角, θ_l 为射入低折射率膜料的折射角, n_0 为基底折射率, n_h 为高折射率材料的折射率, n_l 为低折射率材料的折射率^[6, 7]。对于给定的两种高低折射率材料, 可以通过两种方法满足上式: 一种是给定入射角度, 设计入射介质(棱镜)的折射率; 一种是给定棱镜折射率, 设计入射角度。

当偏振条件不满足时, p 偏振光将出现窄而有一定深度的反射带, 此时满足高的消光比的带宽将变窄, 但在一定的波长范围内仍具有较好的偏振特性。在实际制备中, 对于常用膜料和基底材料, 很难满足上面偏振条件关系式, 而且物理气相沉积条件的波动也限制了偏振条件的满足。在设计中发现, 不满足偏振条件关系式的膜料和基底的折射率组合在某个波长处完全可以实现较好偏振分光的性能。

在实际应用中, 通常是利用某个波长的偏振特性。笔者从实际制备和批量生产的角度出发, 使用不满足偏振条件关系式的常用膜料(如 ZrO₂ 和 SiO₂ 膜料光学性能优良, 沉积工艺稳定)和基底材料(如 K9 玻璃

作者简介: 沈自才(1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事渐变折射率薄膜(非均匀膜)和偏振技术研究。

* 通信联系人。E-mail: xzfai@fih.com

收稿日期: 2003-12-08 收到修改稿日期: 2004-04-23

化学性能稳定、加工方便、价格低)的组合,通过对多层膜系的优化设计来实现偏振性能优良,带宽相对较宽的窄带偏振分光膜;同时,可以通过对偏振膜镀制过程中监控波长的改变来灵活实现满足在不同波长处具有优良偏振特性的偏振膜,薄膜偏光分束镜及膜层结构见图 1。

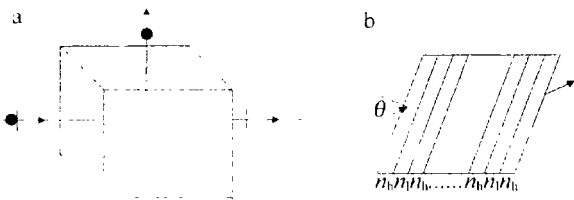


Fig 1 Schematic diagram of the splitting prism and its coatings

笔者设定采用折射率为 1.52 的 K9 玻璃作为入射介质(棱镜), SiO_2 的折射率为 1.46 ZrO_2 的折射率为 1.92 要达到的指标为:取入射角 $\theta = 45^\circ$, 在波长 540nm 处满足 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 。

应用 TFCalc 膜系设计软件对膜系进行优化设计,从实际制备出发满足每层厚度都是 1/4 波长的整数倍,可以得到最佳膜系结构为 $H3L(HL)^n H3LH$ 。其中 H 表示高折射率膜料, L 表示低折射率膜料。然后分别对 n 取 9~14 分析,图 2 为 $n=13$ 的膜系模拟的结果示意图(上线表示 p 光透射,下线表示 s 光透射)。不同的 n 取值,具体满足 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 的波长范围参数见表 1。

Table 1 Range of wavelength with $T_p > 99\%$ and $T_s < 1\%$ in different n parameters

range of n	9	10	11	12	13	14
range of wavelength/nm	520~	518~	516~	514~	512~	511~
wavelength/nm	540	543	546	549	551	513

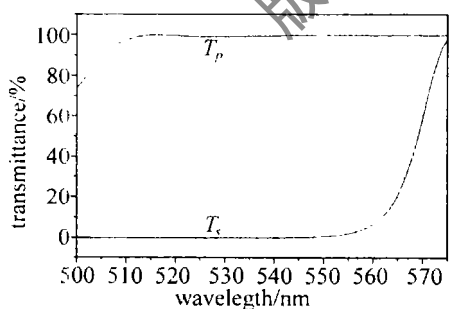


Fig 2 Schematic diagram of $H3L(HL)^{13}H3LH$ film

由表分析可知,随着层数的增加,满足条件的波长范围展宽,原因是随着层数的增加, s 偏振光的反射增加,而同时 p 偏振光的透射增加,满足 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 的带宽也增加;但是,当 n 达到 13 之前,展宽相对明显,而当 n 达到 13 之后,波长范围的展宽变缓,因此可以取 n 值为 13。

所以,本设计采用折射率为 1.52 的 K9 玻璃作为

入射介质(棱镜), SiO_2 (折射率为 1.46) 和 ZrO_2 (的折射率为 1.92) 作为原材料^[8,9],制备要达到的条件为:在波长 540nm 处满足 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 的棱镜偏振膜时的理想膜系为: $H3L(HL)^{13}H3LH$ 。

2 样品的制备

采用优化设计后的膜系: $H3L(HL)^{13}H3LH$, 用折射率为 1.52 的 K9 玻璃作为入射介质(棱镜)为基底,折射率为 1.46 的 SiO_2 , 折射率为 1.92 的 ZrO_2 为蒸发材料,采用电子束蒸发方式,利用北京仪器厂生产的真空镀膜机(ZZSX-500A)蒸镀偏振膜,镀膜室尺寸为: $\varnothing 500\text{mm} \times 678\text{mm}$ 。采用油扩散泵,监控方式为透射光监控,监控波长为 635nm。具体实验条件见表 2。

Table 2 The deposition parameter of polarizing

vacuum /Pa	index temperature / $^\circ\text{C}$	the power of E-beam gun /mA
2.6×10^{-2}	2.4×10^{-2}	50(SiO_2) 90(ZrO_2)
reference wavelength /nm	charge gas	gas quantum /Pa
635	O_2	2.4×10^{-2}

3 性能测试与分析

3.1 透射光谱特性分析

本文中所设计的棱镜偏振膜的主要指标为透过率,即要求 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 。为此,将两块三角棱镜用甘油粘合在一起,用 Lambda900 分光光度仪测量其透射特性,测试系统光路见图 3。测试结果在 540nm 处为: $T_p = 98.578\%$, $T_s = 0.3073\%$ 。其透射光谱曲线见图 4。

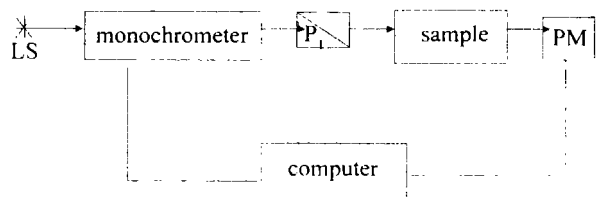


Fig 3 The system of experiment

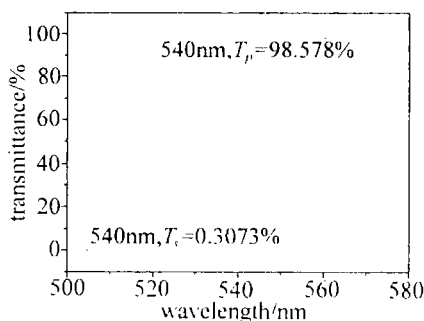


Fig 4 The splitting graph of the sample

实验测得的结果为 p 光的透射率为 98.578%, 小于设计的透射率大于 99%。分析其原因有以下几个方面:

(1) 棱镜的入射面和出射面应该为高透过率, 即应该镀有增透膜, 虽然理论上的增透可以达到很高, 但是总会存在 0.25% 左右的反射, 这样两个面就会有 0.5% 左右的反射, 即总是有部分反射的存在; (2) 膜系的设计是按没有散射和吸收来设计的, 但是实际中材料总是存在或多或少的部分散射和吸收; (3) 在制备过程中, 本实验为人工操作, 而不是计算机自动控制, 客观条件的限制 (人的判断力), 总会给膜的镀制带来误差; (4) 样品的粘合是用甘油来粘合的。这样, 一方面甘油的折射率和 K9 并不是完全相同, 这样也带来误差; 另一方面, 甘油的均匀性或胶合的两个面并不是严格的平行, 也给实际测量带来误差。

因此, 虽然制备的棱镜偏振膜测量结果离满足设计指标尚有少许差距, 但是理论上是完全可行的, 制备上考虑到误差因素也是完全可行的。

3.2 偏振特性的测试

利用偏振分析系统搭建的测试光路如图 5 所示。所使用的激光器为钕玻璃激光器二倍频光 (532nm), 样品为中心波长在 532nm 附近的薄膜偏光分束镜, 检偏器为双折射晶体格兰汤姆逊棱镜 (对入射角不敏感, 其消光比在 10^{-6} 左右), 探测器探测到的信号输入计算机。检偏器装在步进马达的旋转支架上, 检偏器在马达的驱动下可以绕光线轴旋转。

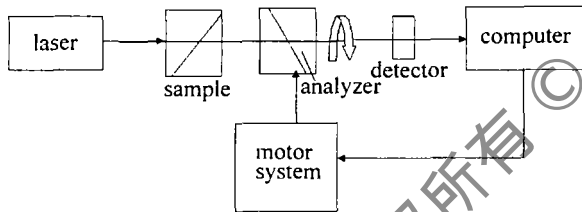


Fig 5 The polarizing characteristics test system

首先调整检偏器使通过它的光强信号最小, 然后使步进马达开始旋转。棱镜旋转一周得到的相对光强变化曲线如图 6 所示。由图可以看出: 该样品在检偏

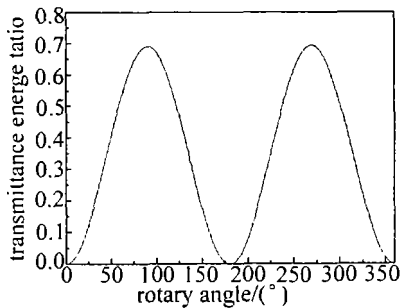


Fig 6 The polarizing graph of the sample

器旋转 360° 的情况下, 其曲线完全遵守马吕斯定律, 且最小光强基本为 0 两个光强峰值对称, 这说明样品棱镜的起偏振性能非常优良。

3.3 监控波长对偏振特性的影响

通过计算机模拟发现, 对以 K9 玻璃 ($n = 1.52$) 为

基底、以 ZrO_2 和 SiO_2 为高低膜料制备棱镜偏振膜, 在不同的参考波长处, 满足 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 的带宽, 见表 3。

Table 3 Wavelength width with different reference wavelength

reference wavelength /nm	530	565	600	635	670
range of wavelength/nm	430~	458~	485~	512~	539~
width of wavelength/nm	464	494	522	551	581

由表中数据可以看出, 随着参考波长变大, 偏振带向右漂移, 同时带宽变大; 同理, 可以推出, 随着参考波长减小, 偏振带向左偏移, 带宽减小。分析如下: 对于两种不同折射率材料, 由 $\Delta g = 2 \sin^{-1} [(n_h - n_l) / (n_h + n_l)] / \pi$, $g = \lambda_0 / \lambda$, 所以 $\Delta g = (\lambda_0 / \lambda_2) - (\lambda_0 / \lambda_1)$ 。由此可以得出: 对两种已知材料, Δg 不变, 而随着参考波长 λ_0 右移, 中心右移, 同时 $\lambda_1 - \lambda_2$ 增大, 所以满足条件的带宽增大。

4 结论

利用 TFCalc 软件对 K9 (1.52) 玻璃为基底、 ZrO_2 和 SiO_2 为高低膜料进行了膜系优化设计; 设计出在 540nm 处的最佳膜系为 H3L(HL)¹³H3IH。基于该优化设计方案在北京仪器厂产 ZZSX-500A 真空镀膜机上进行了镀制。最后对样品的偏振特性、p 光和 s 光的光谱特性等性能进行了测试和分析。测试分析结果表明: 薄膜偏光分束镜的偏振特性优良; p 光和 s 光在 540nm 处有较好分光特性; 同时发现随层数的增加, 满足条件的偏振带宽增加; 随着参考波长的增加, 整个偏振图谱向右漂移, 而且满足 $T_p > 99\%$, $T_s < 1\%$ 的带宽逐渐增大。

参考文献

- [1] 金国藩, 李景镇. 激光测量学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998 221~224
- [2] 吴福全, 李国华. 激光高效偏光镜的研究 [J]. 中国激光, 1995 A22(1): 37~39.
- [3] 何孟权, 郑颖君. 激光偏振分光镜的设计和测试 [J]. 光学技术, 1983(6): 21~26
- [4] 强西林, 高明. 棱镜偏振分光膜研究 [J]. 西安工业学院学报, 2000 20(2): 106~109.
- [5] BANNING M. Practical methods of making and using multiple layer filters [J]. JO S A, 1947(37): 792~797
- [6] 田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册 (上) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991 263~380
- [7] MACNEILE S M. Beam splitter [P]. U S Patent 2403731, 1946-06-06
- [8] 林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990 269~273
- [9] 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984 211~213