

窄带薄膜偏光分束镜的研制及其性能测试

孔伟金^{1,2} 吴福全¹ 郝殿中¹ 王吉明² 邵建达²

(1 曲阜师范大学激光研究所, 山东曲阜 273165)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 本文采用非 MacNeille 形式的薄膜偏光分束镜的设计, 在 K_9 基体上交替镀制了 ZrO_2 和 SiO_2 薄膜, 从而在 690 nm 处实现了 P 光和 S 光的偏振分光. 搭建了三个偏光测试系统对样品的偏光性能进行了测试, 测试结果表明: 透射率曲线和理论设计曲线吻合得很好; 透射 P 光的消光比优于 1.3×10^{-3} , 可以作为优良的起偏镜; 入射角变小时其消光比呈变优趋势.

关键词 薄膜偏光分束镜; 偏振性能; 透射率曲线

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A

0 引言

光的偏振特性是指在垂直光传播方向上振动方向的不对称性, 它说明光是横波, 表征了光本身的传播特性. 光可以用振幅、相位和频率三个参量描述, 而且不同的偏振光具有不同的振幅和相位差, 特别是偏振光与光学器件相互作用后, 其偏振态势要发生改变, 因此, 偏振光可以作为信息的载体和携带者进行信息的传递和交流^[1,2]. 常用的起偏器件和检偏器件是利用晶体的双折射特性设计而成^[3,4], 但由于通常使用的冰洲石晶体是一种天然晶体, 透明无色、纯净的晶体很少, 且不易得到大块, 所以晶体起偏镜不容易做成大口径. MacNeille 形式的薄膜偏振分光镜是基于薄膜内光的干涉作用和布氏角的特点研制而成^[5,6], 其优点是: 口径大、损耗低、系统设计灵活, 具有较大的工作带宽, 但是其基体和薄膜折射率之间要满足一定的匹配条件, 且符合这个匹配条件的膜料和基体不是很多. 在有些需要起偏和检偏的实验系统中要求对单波长就足够了, 为此我们设计了一种非 MacNeille 形式的薄膜偏光分束镜.

1 非 MacNeille 形式薄膜偏振分光镜的设计与制备

MacNeille 形式的薄膜偏振分光镜是 MacNeille 在 1946 年发明的, 它是基于布氏角和薄膜内光的干涉原理进行设计, 贝宁 (Banning) 实际制作而成^[7,8]. 该种形式的棱镜可以工作在较宽的光谱范围, 透射光的消光比较高. 但是它要求基体的折射率和高低薄膜的折射率要满足如下关系

$$n_0 \sin \theta_0 = \frac{n_H n_L}{(n_H^2 + n_L^2)^{1/2}} \quad (1)$$

式中 θ_H 和 θ_L 分别为光在高 (n_H)、低 (n_L) 折射率薄膜中的折射角, n_0 为玻璃基体折射率. 但是通常很难找到满足这个折射率匹配条件的膜料, 即使有, 在制作过程中由于不同的蒸发条件其薄膜的折射率也会发生改变^[9,10]. 在设计中发现, 不满足上面折射率匹配条件的膜料和基体的折射率组合在某个波长处完全可以实现偏振分光的性能. 为此, 我们以 K_9 玻璃为基体 (具有化学性能稳定、加工方便、价格低等优点), 以 ZrO_2 和 SiO_2 为高低折射率膜层进行了设计. 为了使用时光路调节方便, 在设计时光在膜层面上的入射角仍为 45° . 其设计指标和结构分别如表 1 和图 1 所示.

表 1 单波长单角度薄膜偏光镜的设计指标

中心波长/nm	带宽/nm	Tp	Ts	消光比
690	50	$\geq 96\%$	$\leq 0.5\%$	10^{-3}

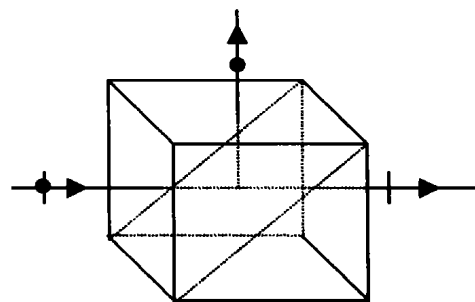


图 1 薄膜偏光分束镜的结构

Fig. 1 The structure of the splitting prism

利用 TFCalc 软件对膜系进行优化设计, 给出优化后的膜系为 $G/0.5HL(HL)^{13}H0.5LH/G$. 其中 G 表示基体玻璃的折射率 1.52, H 表示 ZrO_2 的折射率 1.92, L 表示 SiO_2 的折射率 1.46. 优化后 P 光 (C 曲线) 和 S 光 (B 曲线) 的透射率随波长变化的理论曲线如图 2 所示, 由图 2 可以看出: 在中心波长 690 nm 处的消光比较高, 设计时所使用的控制波长为 850 nm.

镀制过程采用光学极值法控制膜厚, 监控光路为透射方式. 薄膜的镀制使用的是韩国 Alpha-plus 公司产 M/N; ML-900 高性能真空镀膜机, 该机采用

冷凝泵, 镀膜过程是由计算机完全控制的, 从而减小了人为控制误差. 实验条件如表 2 所示.

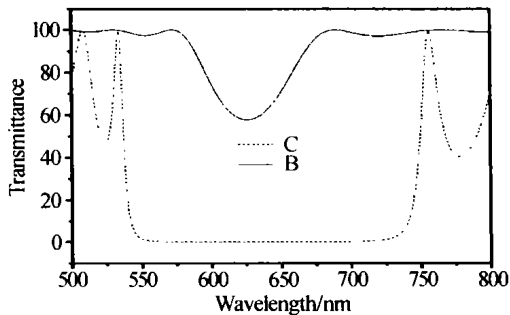


图 2 设计的理论分光特性曲线
Fig. 2 The design of splitting beam graph

表 2 薄膜偏光分束镜的制作条件

背景真空度	基体温度	电子枪速流/mA	控制波长/nm
2.5×10^{-3} Pa	200°C	50 (SiO ₂) 100 (ZrO ₂)	820

2 样品棱镜的性能测试与分析

薄膜偏光分束镜的性能由透射比、消光比、带宽以及视场角等指标标定. 本文中搭建了三个实验系统对样品的偏振性能、透射比、透射 P 光的消光比以及消光比随角度变化的关系等进行了测试, 并对测试结果给出了相应的分析.

2.1 偏振特性的测试

利用偏振分析系统搭建如图 3 所示测试光路: 其中激光的波长为 650 nm, 样品为中心波长在 690 nm 附近的薄膜偏光分束镜, 检偏器为格兰·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, 检偏器在步进马达的驱动下可以绕光线轴旋转.

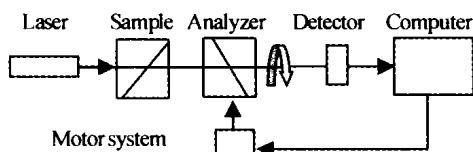


图 3 样品偏振特性测试系统
Fig. 3 The polarizing character test system

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 4 所示. 由图可以看出: 该样品

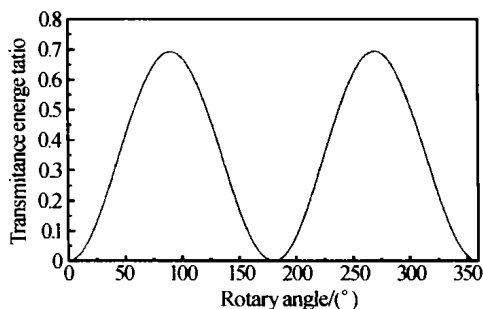


图 4 样品的偏振特性曲线
Fig. 4 The polarizing graph of the sample

在检偏器旋转 360° 的情况下, 其曲线完全遵守马吕斯定律, 且最小光强基本为零; 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.

2.2 透射光谱特性分析

薄膜偏光分束镜的透射比在光学技术应用中有重要的意义, 理想的偏光器件针对特定的偏振态应该有接近 100% 的透射. 为此, 在 Agilent 8453 紫外—可见分光光度计对其透射比进行了测试. 实验前在光路中放入格兰·泰勒棱镜, 先扫描基线, 然后在格兰·泰勒棱镜后面放入样品, 调整样品的方位角, 使透射的光为光波场振动方向平行于入射面的 P 光, 探测到的数据为 P 偏振光的透射比; 以入射光为轴旋转样品为 90°, 则探测到的数据为样品 S 偏振光(光波场振动方向垂直于入射面)透射比. P 光、S 光的透射比曲线如图 5; 其中 B 和 C 分别为 P 光和 S 光的透射率.

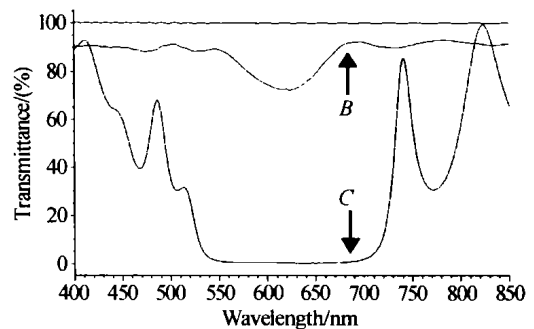


图 5 样品 3 的分光特性曲线
Fig. 5 The splitting graph of the sample

由图可知: 我们设计制作的薄膜偏光分束镜在 690 nm 附近有 50 nm 的带宽, 理论曲线和实际测试曲线基本吻合. 其透射比在 650 nm 偏低是因为膜料折射率不匹配所致.

2.3 样品消光比的测试

在光盘存储技术中, 出射光束的偏振度对整个系统的灵敏度和信噪比有很大的影响. 而在大型液晶显示系统中, 薄膜偏光分束镜的消光比则影响显示系统的对比度、亮度和色彩的分辨率等性能指标^[11], 因此消光比是薄膜偏光分束镜的一个重要参数.

棱镜的消光比 ρ 一般定义为透射光束中 S 分量 T_s 和 P 分量 T_p 的比值^[12], 即

$$\rho = T_s/T_p \tag{2}$$

由于实验所关心的是透射 P 光的消光比, 为此搭建了如图 6 所示的系统来测量薄膜偏光分束镜透射光束的消光比. 其中 A、B、C、D、E、F 和 G 分别为

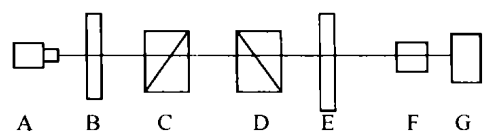


图 6 薄膜偏光分束镜的消光比测试系统
Fig. 6 The test system of extinction ratio

He-Ne 激光器, 1/4 波片, 薄膜偏光分束镜样品, 格兰·泰勒棱镜, 衰减片组, 光电倍增管和显示器。

由于 He-Ne 激光器发出的光具有部分偏振性且不稳定, 为了使探测到的光强信号稳定, 在 He-Ne 激光器后面加入 1/4 波片, 以改善光束的稳定性^[13]。样品透射的 P 光经格兰·泰勒检偏镜调制(偏振面旋转)后其光强在 360° 范围内出现两次光强极大值 (T_p) 和两次极小值 (T_s), 然后由式(2) 即可计算出透射 P 光的消光比。另外, 在光强极大时我们在光路中插入经中国计量科学院对 633 nm 定标的标准衰减片, 以防止探测器的饱和以及探测器的非线性对测量精度的影响。利用多次测量取平均的方法, 测得两只样品透射光的消光比分别为 1.1×10^{-3} 和 1.3×10^{-3} 。

从图 5 中的曲线可知: 由于 P 光的透射比在 690 nm 处大于 633 nm, 而 T_s 没有变化, 因此可以说, 样品棱镜在 690 nm 处透射光的消光比不会比 633 nm 光的测量值差。

2.4 样品消光比随入射角的变化关系

由于该棱镜的设计使光在膜层面上是 45° 入射的, 当入射角改变时, 其分光特性和消光比都要受到影响。为此, 在图 6 的实验系统中放样品的平台上加入一个测角仪, 我们对样品透射光束随入射角的变化关系进行了测试, 其结果如图 7 所示, 图中横坐标表示的角度为入射光与棱镜体对角线的法线之间的夹角(设为 θ)。

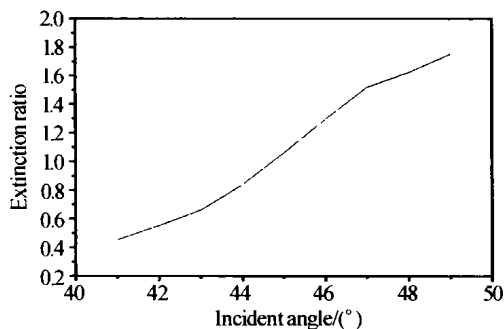


图 7 样品消光比随入射角的变化关系

Fig. 7 The extinction ratio change with incident angle

由测试结果可以看出: 入射角 (θ) 对薄膜偏光分束镜透射光的消光比有一定的影响, 入射角向角度小的方向变化时其消光比呈变优趋势, 入射角向角度大的方向变化时其消光比变差。

3 结论

本文基于非 MacNeille 薄膜偏光分束镜的设计原理, 利用 TFCalc 软件对 $K_9(1.52)$ 玻璃为基体, ZrO_2 和 SiO_2 为高低膜料进行膜系优化设计; 根据优化设计方案在韩国 M/N: ML-900 真空镀膜机上进行镀膜。最后对样品的偏振特性、P 光和 S 光的

光谱特性、P 光的消光比以及消光比随入射角的变化关系等性能进行了测试。测试结果表明: 薄膜偏光分束镜的偏振特性优良; P 光和 S 光在 675 ~ 725 nm 范围内有较好的偏振分光特性; 透射 P 光的消光比优于 1.3×10^{-3} ; 测试得到的入射角向角度小的方向变化时其消光比呈变优趋势这一规律与理论相一致。

参考文献

- 1 王海晏, 杨廷梧. 激光水下偏振特性用于目标图像识别. 光子学报, 2003, 32(1): 9 ~ 13
Wang H Y, Yang T W. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1): 9 ~ 13
- 2 孔伟金, 李国华. 偏振光的 X 矢量表示及应用. 光子学报, 2002, 31(11): 1405 ~ 1408
Kong W J, Li G H. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(11): 1405 ~ 1408
- 3 吴福全, 李国华. 激光高效偏光镜的研究. 中国激光, 1995, A22(1): 37 ~ 39
Wu F Q, Li G H. *Chinese Laser*, 1995, A22(1): 37 ~ 39
- 4 金国藩, 李景镇. 激光测量学. 北京: 科学出版社, 1998. 221 ~ 224
Jin G P, Li J Z. *The Test of Laser Technology*. Beijing: Academic Press, 1998. 221 ~ 224
- 5 何孟权, 郑颖君. 激光偏振分光镜的设计和测试. 光学技术, 1983, (6): 21 ~ 26
He M Q, Zheng Y J. *Optical Technology*, 1983, (6): 21 ~ 26
- 6 强西林, 高明. 棱镜偏振分光膜研究. 西安工业学院学报, 2000, 20(2): 106 ~ 109
Qiang X L, Gao M. *The Journal of Xi'an Institute Technology*, 2000, 20(2): 106 ~ 109
- 7 MacNeille S M. Beam splitter. U. S. patent 2. 403. 731 (6 July 1946)
- 8 Banning M. Practical methods of making and using multiple layer filters. *J Opt Soc Am*, 1947, (37): 792 ~ 797
- 9 张晓晖, 丁双红. 规整膜系层厚允许误差的研究. 光子学报, 2003, 32(9): 1145 ~ 1148
Zhang X H, Ding S H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1145 ~ 1148
- 10 田民波, 刘德令. 薄膜科学与技术手册(上). 北京: 机械工业出版社, 1991. 263 ~ 380
Tian M B, Liu D L. *The Thin Film Handbook of Academy and Technology*. Beijing: The Press of Mechanical Industry, 1991. 263 ~ 380
- 11 Li H F, Huang H C. Broadband, large acceptance angle polarizing beam splitter for reflective LCD projectors. *Proceeding of SPIE*, 2000, 3954: 186 ~ 196
- 12 王召兵, 李国华. 消光比自动测试系统的实验研究. 中国激光, 2000, 27(5): 415 ~ 418
Wang Z B, Li G H. *Chinese Laser*, 2000, 27(5): 415 ~ 418
- 13 赵明山, 李国华. 全内腔式 He-Ne 激光束偏振特性改善. 激光杂志, 1993, 14(5): 47 ~ 50
Zhao M S, Li G H. *Laser Journal*, 1993, 14(5): 47 ~ 50

The Design and Test of Narrow Wavelength Thin Film Polarizing Beam-splitting Prism

Kong Weijin^{1,2}, Wu Fuquan¹, Hao Dianzhong¹, Wang Jiming², Shao Jianda²

¹ *The Laser Research Institute of Qufu Normal University, Shandong 273165*

² *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

Received date: 2003-11-24

Abstract This article adopts the design of non-MacNeille polarizing beam-splitting prism to realize light splitting of P light and S light at the wavelength of 690 through depositing ZrO_2 and SiO_2 on K_9 alternately. Three systems have been setup to test the polarizing character of the sample. Experiment proves that the transmitted curve is similar with the theoretical one and its extinction ratio is better than 1.3×10^{-3} , which show that the character of extinction is excellent and can be a good polarize prism. At last, it is testified that the smaller the incident angle is, the more excellent extinction ratio is.

Keywords Thin film polarizing beam splitting prism; Polarizing character; Transmittance graph



Kong Weijin was born on December 12th, 1976 in Shandong. He graduated from physics department of Qufu Normal University and obtained the B. S. degree in 1999. He got the M. S. degree from Qufu Normal University in 2003. Now he is working for his Doctor degree in Shanghai Institute of Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include the area of polarized light technology and thin film optical technology.