

文章编号 1004-924X(2023)21-3088-08

780 nm 波段高分光比消偏振分光片的制备及测试

王国超¹, 黄光耀², 朱凌晓¹, 李星辉^{2*}, 颜树华^{1*}

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 消偏振分光片是空间光学中的重要分光元件, 为了实现 780 nm 波段激光在大分光比条件下的稳定分光输出, 设计并制备了一种高分光比消偏振分光片。使用 TFCalc 软件仿真设计了双面消偏振分光膜系, 通过离子束辅助电子束热蒸镀技术制备了消偏振分光片样品。然后, 使用透射电子显微镜、分光光度计对所制备样品进行了测量表征, 得到了分光片的实际薄膜结构及透射光谱, 光谱结果显示该分光片的透射率接近 98%, s 偏振光与 p 偏振光的透射率偏差小于 0.3%。最后, 搭建测试光路对分光片进行变偏振方向、变波长及长时间稳定性等测试。实验结果表明: 该分光片在目标波段内的透射率接近 98%, 偏振方向大范围变化时透射率偏差小于 0.2%, 波长在 772~792 nm 内变化时透射率波动小于 0.12%; 10 h 长时结果显示, 当平均时间为 100 s 时, 分光比与透射率的 Allan 方差分别为 1.41×10^{-3} 和 4.12×10^{-5} 。所提出的消偏振分光片具有良好的消偏振性能, 可直接应用于光学测试计量和量子传感探测等精密测量领域。

关键词: 消偏振; 分光片; 膜系设计; 高分光比

中图分类号: O484.21 文献标识码: A :doi:10.37188/OPE.20233121.3088

Fabrication and performance evaluation of nonpolarizing beam splitter with high splitting ratio in 780 nm band

WANG Guochao¹, HUANG Guangyao², ZHU Lingxiao¹, LI Xinghui^{2*}, YAN Shuhua^{1*}

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

* Corresponding author, E-mail: li.xinghui@sz.tsinghua.edu.cn; yanshuhua996@163.com

Abstract: The unpolarizing beam splitter is a critical beam-splitting element in space optics. A high-splitting-ratio unpolarizing beam splitter was designed and fabricated in this study to achieve a stable output of a 780 nm band laser with a large splitting ratio. First, the double-sided unpolarizing film system was simulated and designed using TFCalc. Next, unpolarizing beam splitter samples were fabricated using ion beam-assisted deposition. Subsequently, the samples were measured and characterized using transmission electron microscopy and spectrophotometry, and the actual film structure and transmission spectrum were obtained. The spectral results showed that the transmittance of the beam splitter was close to 98%, and the

收稿日期: 2023-04-07; 修订日期: 2023-05-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12004428); 湖南省自然科学基金资助项目 (No. 2021JJ30774); 湖南省自然科学基金优秀青年项目 (No. 2021JJ20047); 清华大学深圳国际研究生院科研启动项目 (No. QD2020001N); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2020M683729)

transmittance deviation $|T_s - T_p|$ was lower than 0.3%. Finally, the actual performance of the beam splitter was experimentally evaluated. The experimental results show that the transmittance of the beam splitter is close to 98% in the target wavelength band, and the transmittance deviation $|T_s - T_p|$ is lower than 0.2% when the polarization direction changed in a broad range. The transmittance fluctuation is lower than 0.12% at 772-792 nm. The 10 h long-term results indicated that when the average time is 100 s, the Allan variances of the split ratio and transmittance are 1.4×10^{-3} and 4.12×10^{-5} , respectively. The proposed unpolarizing beam splitter exhibits good depolarization performance and can be directly applied to precision measurement fields, such as optical test metrology and quantum-sensing detection.

Key words: nonpolarizing; beam splitter; film system design; high splitting ratio

1 引 言

消偏振分光片以其对入射光的偏振态不敏感、出射光仍能保持入射光的偏振特性,在自由空间光学系统里面得到了广泛的应用。消偏振分光片与消偏振分光棱镜统称为消偏振分束器,但由于分光片没有光学胶层,相比分光棱镜具有更高的损伤阈值与更小的光学损耗,能承受更高功率的激光,因此,常应用在光功率要求相对较高的条件下^[1-5]。消偏振分光片的原理本质上是在普通分光片上进行消偏振镀膜。普通分光片通常要求光倾斜入射至分光片表面,但在光倾斜入射界面时,由于电场和磁场的切向分量要满足在界面两侧连续的边界条件,s偏振光与p偏振光具有不同的有效折射率,致使透射率表现出偏振效应,即透射率随着偏振的变化而产生波动,降低光学系统的偏振性能^[6]。为了消除偏振效应的影响,通过在分光片表面镀制特殊的薄膜可以实现消偏振分光。

消偏振分光的性能主要用p偏振光与s偏振光之间的透射率偏差来衡量。目前,常用的消偏振分光片的透射率偏差一般为5%左右。在精密光学领域,由于光的偏振态会影响器件的分光比及透射率等参数,故系统器件要具有更小的透射率偏差^[7-8]。例如,冷原子干涉系统要求原子操控激光的功率必须稳定,但在分光时激光的偏振变化会引起激光功率的震荡,从而降低功率稳定度。在量子通信领域,光偏振态的不稳定会提高系统的误码率,进而影响通信码率^[9]。此外,一些其他应用场景还要求光学器件具有高透射率甚至是全透射^[10]。大多数利用分光反馈进行激光

功率稳定的系统,其反馈回路中的分束器应具有高的分光比,尽可能提高输出功率,从而提升系统的输出效率。但是,分光比越高,透射分量与反射分量所产生的微小扰动会使分光比产生很大的波动^[11]。在高分光比下,消偏振分光片的稳定分光更难实现。因此,需要对消偏振薄膜进行精细化设计,使它在实现高分光比的同时具备良好的消偏振性能。

针对上述高分光比消偏振的要求,最有效的解决方案是在镀膜机制上使用折射率匹配的多层膜结构,在特定的波长范围内有效地降低偏振效应^[12]。Gilo等使用3种不同折射率材料实现了消偏振膜设计,但其膜层多达20层,且透射率不能在特定波段保持恒定^[13]。王文梁等在Gilo的基础上设计了近红外双波段消偏振分光膜,其膜层数高达38层,然而,膜层数过多不利于实际工艺中的薄膜镀制^[14-15]。膜层的厚度对薄膜的光学性能有很大的影响,要实现良好的消偏振效果,镀制膜层的膜厚要精确控制到纳米级别^[12]。

本文通过分析偏振效应,采用低折射率 SiO_2 和高折射率材料 Ta_2O_5 两种不同材料进行消偏振薄膜的构造,并使用Needle优化法实现膜系优化,设计并镀制了750~810 nm波段的消偏振分光膜,在目标波段中实现了稳定的分光比,且透射率偏差小于0.2%,该分光片具有优良的消偏振性能。

2 消偏振分光片的设计与制备

2.1 消偏振理论

偏振光可被分解为两个相互垂直的极化波的叠加,选取电场矢量垂直于入射面的分量为s

偏振光或 TE 波,而电场矢量平行于入射面的分量为 p 偏振光或 TM 波。当光波以入射角 θ 入射至折射率为 n 的介质时, p 偏振光与 s 偏振光会表现出不同的有效折射率 n_p, n_s , 如下^[13,16]:

$$\begin{cases} n_p = \frac{n}{\cos \theta} \\ n_s = n \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

因此,当光的偏振方向改变时,介质将具有不同的透射率。根据电场切向分量和磁场切向分量界面两侧连续的边界条件,在折射率为 n_1 和 n_2 的两个理想介质分界面上,当光波以角度 θ_1 入射时,透射角为 θ_2 , s 偏振光和 p 偏振光的透射率为:

$$\begin{cases} T_s = \left| \frac{2\zeta_1}{\zeta_1 + \zeta_2} \right|^2 \left(\frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \right)^2 \\ T_p = \left| \frac{2\zeta_1}{\zeta_1 + \zeta_2} \right|^2 \left(\frac{n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2} \right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 ζ 为光学有效导纳,其公式如下:

$$\zeta_i = \begin{cases} n_i \cos \theta_i, & \text{s波} \\ \frac{n_i}{\cos \theta_i}, & \text{p波} \end{cases} \quad (3)$$

透射角 θ_2 可通过菲涅尔方程 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 得到。从式(2)可知, s 偏振光与 p 偏振光的透射率不同,并且会随着入射角的变化而改变。这种不同偏振光具有不同透射率的效应即为偏振分离效应^[17]。偏振分离程度可以用 p 偏振光和 s 偏振光的光学有效导纳的比值来衡量。对于单界面,其定义为:

$$\Delta n = \frac{\zeta_p}{\zeta_s} = \frac{n / \cos \theta}{n \cos \theta} = \frac{1}{\cos^2 \theta} \quad (4)$$

由式(4)可知,单界面的偏振分离程度只与入射角相关,当光倾斜入射至界面时,必定存在偏振分离现象。为了实现消偏振分光,可以通过构造多层膜系,采用特定的材料匹配及膜系结构,使整体膜系对于 s 偏振光与 p 偏振光有相近的等效光学导纳,从而消除偏振效应的影响。

多层膜的透射率公式如下:

$$T = \frac{4\zeta_0 \zeta_G}{(\zeta_0 B + C)(\zeta_0 B + C)^*}, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} &= \left\{ \prod_{i=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \frac{j}{\zeta_i} \sin \delta_i \\ j\zeta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \zeta_G \end{bmatrix}, \\ \delta_i &= \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i \cos \theta_i, \\ \zeta_i &= \begin{cases} n_i \cos \theta_i, & \text{s波} \\ \frac{n_i}{\cos \theta_i}, & \text{p波} \end{cases} \end{aligned}$$

其中: $[B, C]^T$ 为多层薄膜的组合特征向量,由此可得多层薄膜的光学等效导纳 $Y = C/B$ 。单层光学厚度为 $\lambda/4$ 的薄膜的偏振分离为:

$$\Delta Y = \frac{Y_p}{Y_s} = \frac{(\Delta n_1)^2}{\Delta n_G} \quad (6)$$

推导可得单层膜的消偏振条件为:

$$1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n_G^2} = \left(1 - \frac{n_0^2 \sin^2 \theta_0}{n_1^2} \right)^2 \quad (7)$$

由此可知,已知膜厚和入射角,并且入射介质与出射介质的折射率固定时,可通过合理选择膜层介质的参数实现消偏振分光。该式可推广至多层膜情况,通过求解消偏振条件公式,可能求得满足消偏振条件的膜系结构。

通过多层膜的透射以及材料及膜厚的合理匹配, p 偏振光与 s 偏振光有可能实现相同的透射率,从而实现消偏振分光^[18]。根据 Costich 的消偏振理论,可用低折射率材料与高折射率材料构造对称膜系来消除偏振分离效应^[12]。更进一步地,具体膜系的构造可使用 Needle 法进行优化^[14,19-20]。Needle 法的思路是在给定的膜系中插入一层薄层,使原膜层的折射率在插入位置处发生突变,即在低折射率膜层中插入高折射率薄层,或者在高折射率膜层中插入低折射率薄层,改变原有膜系的光学参数,并结合评价函数计算最优的薄层插入位置,持续迭代该过程,增加膜系层数,最终得到满意的结果。

2.2 膜系设计及仿真分析

膜系的优化设计使用专用膜系设计软件 TFCalc 实现。针对 780 nm 激光的应用场景,在稳功率应用中,需要使用分光片对出射光进行分光,从而实现反馈控制。在该情况下,分光片在 780 nm 的附近波段要具有良好且稳定的消偏振性能,以最大限度地降低功率波动水平^[11]。因

此,本文设计的消偏振分光薄膜的目标波段为 750~810 nm,入射角为 45° ,分光比 $T:R=49:1$,且在工作波段中分光比稳定。本文使用 SiO_2 作为低折射率材料, Ta_2O_5 作为高折射率材料进行消偏振膜系的构建^[21-22]。所采用的膜系结构为 $\text{Sub}(\text{HL})^4|\text{Air}$ 结构, L 和 H 分别为低折射率材料 SiO_2 和高折射率材料 Ta_2O_5 ,入射介质为空气,基底为 K9 玻璃,分光片的前后表面膜系呈对称分布。使用软件进行仿真优化,并应用 Needle 法进行优化设计,得到最终的消偏振膜系。使用 H, L 分别表示 Ta_2O_5 和 SiO_2 在入射光以 45° 入射时对应参考波长(780 nm)的四分之一波长厚度,则膜系结构具体设计为: $\text{Sub}/0.41\text{H}0.45\text{L}0.68\text{H}2.22\text{L}2.32\text{H}0.21\text{L}1.26\text{H}1.03\text{L}/\text{Air}$ 。

根据该膜系结构,仿真得到入射光以 45° 入射该薄膜时的透射光谱,如图 1 所示。从光谱图中可以看出,在 750~810 nm 波段, p 偏振光与 s 偏振光的透射率基本一致,稳定在 98%,波动在 0.03% 以内;此外, p 偏振光与 s 偏振光的透射率偏差在 0.02% 以下,满足目标要求。

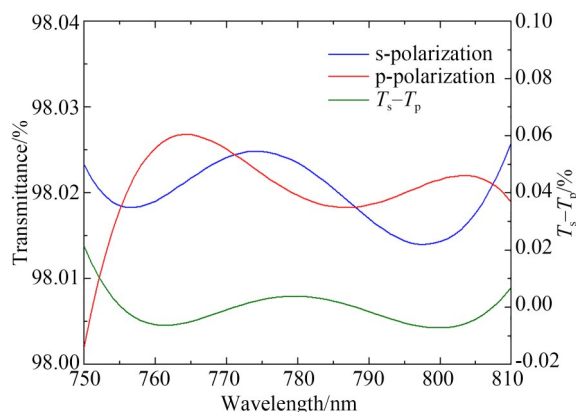


图 1 双面消偏振膜的仿真透射率光谱

Fig. 1 Simulated transmittance spectra of proposed double-side nonpolarizing film

2.3 消偏振分光片制备

确定膜系设计后,本文使用离子束辅助电子束热蒸镀的方法进行消偏振分光薄膜的镀制。镀制时,在真空室内使用电子束加热蒸发膜料,使膜料气化并向基板运输,在此过程中使用离子束轰击基板,最终在基板上凝结成薄膜。离子束能够起到清洁基板表面杂质,提高膜料分子活动能力的作用,该方法所镀制的薄膜具有致密性

好、结合力强及稳定性高的优点。所用镀膜设备为 OTFC-1300 镀膜机,膜厚监测为晶控方式,膜料为 Ta_2O_5 及 SiO_2 ,基底材料为 K9 玻璃,进行双面镀膜。 Ta_2O_5 及 SiO_2 的蒸发速率分别为 0.3 nm/s 和 0.8 nm/s,在镀制 Ta_2O_5 时,需要向真空室内填充 O_2 ,流量为 30 mL/min (standard cubic centimeter per minute),镀制温度为 160°C ,最终镀制得到消偏振分光片。

3 测量实验与结果

3.1 薄膜表征

为了确定结构参数,需要对消偏振分光片进行表征,各膜层的厚度是膜系的基本表征参数。为了测量分光片各膜层的膜厚,确定其实际的薄膜结构,需要获取分光薄膜的截面样本。首先,使用聚焦离子束 (Focused Ion Beam, FIB) 进行样本加工, FIB 设备型号为 Helios G4 UC,其离子束加工分辨率可达 2.5 nm。加工前在分光片表面镀制 Pt 保护层,以防镀层被破坏。此外,由于分光片为绝缘材料,不利于 FIB 加工,故加工时需用电胶带连接分光片的上下表面,使离子束能够击穿分光片。最终,使用 FIB 加工得到长宽约 $8\text{ }\mu\text{m}$,厚度约 100 nm 的薄膜界面样本。然后,使用透射电子显微镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 对镀制分光薄膜进行测量。所用 TEM 为 FEI Tecnai G² F30 场发射透射电子显微镜,其点分辨率达到 0.205 nm,线分辨率为 0.102 nm。TEM 的测量结果如图 2 所示。

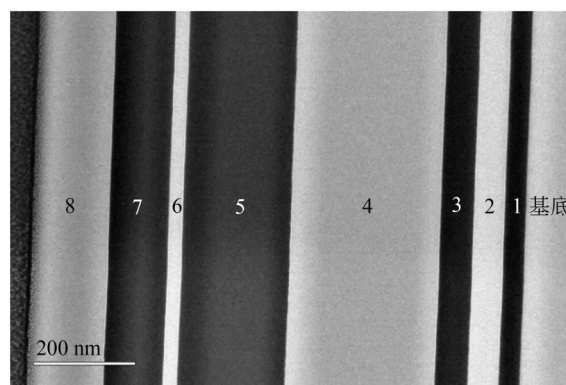


图 2 TEM 测量图像

Fig. 2 TEM measurement image

根据图 2 可以得到各膜层厚度,如表 1 所示。对比实测膜系与设计膜系,二者的膜厚存在一定偏差,第 1~7 层膜的偏差值在 6 nm 以内,第 8 层膜的偏差最大,为 10.68 nm。从测量图像中能够观测到各膜层边缘基本顺直,无扭曲变形及毛刺等情况,说明镀制膜层贴合良好,界面平滑。而且,各膜层内部均一性良好,未观测到杂质与明显缺陷,说明各膜层分布均匀。以上结果表明,所制备的消偏振分光片镀膜质量高,可开展进一步的性能实验研究。

表 1 设计膜系及实测膜系对比结果

Tab. 1 Comparison results of design and actual films

层数	设计膜系/nm	上表面/nm	偏差/nm
1	36.72	42.31	5.59
2	60.36	59.61	-0.75
3	60.98	66.12	5.14
4	296.90	292.95	-3.95
5	208.75	213.45	4.70
6	28.05	26.94	-1.11
7	113.20	118.32	5.12
8	137.79	148.47	10.68

3.2 光谱测量

镀制得到消偏振分光片后,使用分光光度计进行实际光谱测量。所用分光光度计为 Cary5000,配备 UMA 附件,能够测量分光片在不同角度下 s 偏振光或 p 偏振光的绝对反射率及透射率。设定入射角为 45°,测量波段为 750~810 nm,对分光片进行光谱测量,结果如图 3 所示。

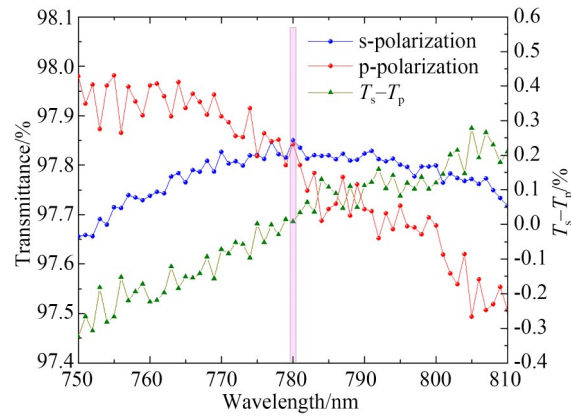


图 3 消偏振分光片的光谱测试结果

Fig. 3 Spectral test results of nonpolarizing beam splitter

从图 3 可以看出,所镀制的消偏振分光片在目标波段 750~810 nm 内的消偏振性能较好,与设计光谱基本对应,s 偏振光与 p 偏振光的透射率稳定在 97.5%~98% 以内,在目标波段 s 偏振光与 p 偏振光的透射率偏差 $|T_s - T_p| < 0.3\%$ 。780 nm 为消偏振波段的中心波长,图 3 阴影区域所示为 780 nm 的透射率结果,可以看到该消偏振分光片对 780 nm 激光具有最佳的消偏振性。s 偏振光与 p 偏振光的透射率偏差 $|T_s - T_p|$ 接近 0%,随着波长逐渐远离 780 nm,透射率偏差 $|T_s - T_p|$ 逐渐增大。

3.3 性能实验

为了测试该消偏振分光片在实际光路中的表现性能,将它放置在实际激光光路中,分别测量其反射光与透射光的激光功率,得到其实际透射光谱,以分析该消偏振分光片的实际消偏振性能。实验搭建的测试系统如图 4 所示。

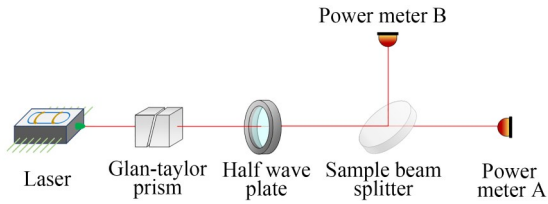


图 4 消偏振分光片性能测试系统示意图

Fig. 4 Schematic of characteristic measurement system for nonpolarizing beam splitter

在激光入射至消偏振分光片前,放置一个格兰泰勒棱镜以及一个半波片,格兰泰勒棱镜可保证入射至分光片的激光为线偏振光,半波片则可以改变偏振方向,以此来测试分光片对不同偏振光的光学性能。激光光路中所用激光器为 Toptica DL 100,激光输出功率在百 mW 量级,功率稳定度优于 0.1%。入射激光波长为 780 nm,测试时,转动半波片,每转动 10°,记录当前的透射功率及反射功率,最终测得不同偏振方向的偏振光对该消偏振分光片的实际透射光谱,如图 5 所示。

图 5(a)为分光片的分光比测试结果,分光比随着偏振角的变化在 55~62 内浮动。图 5(c)为

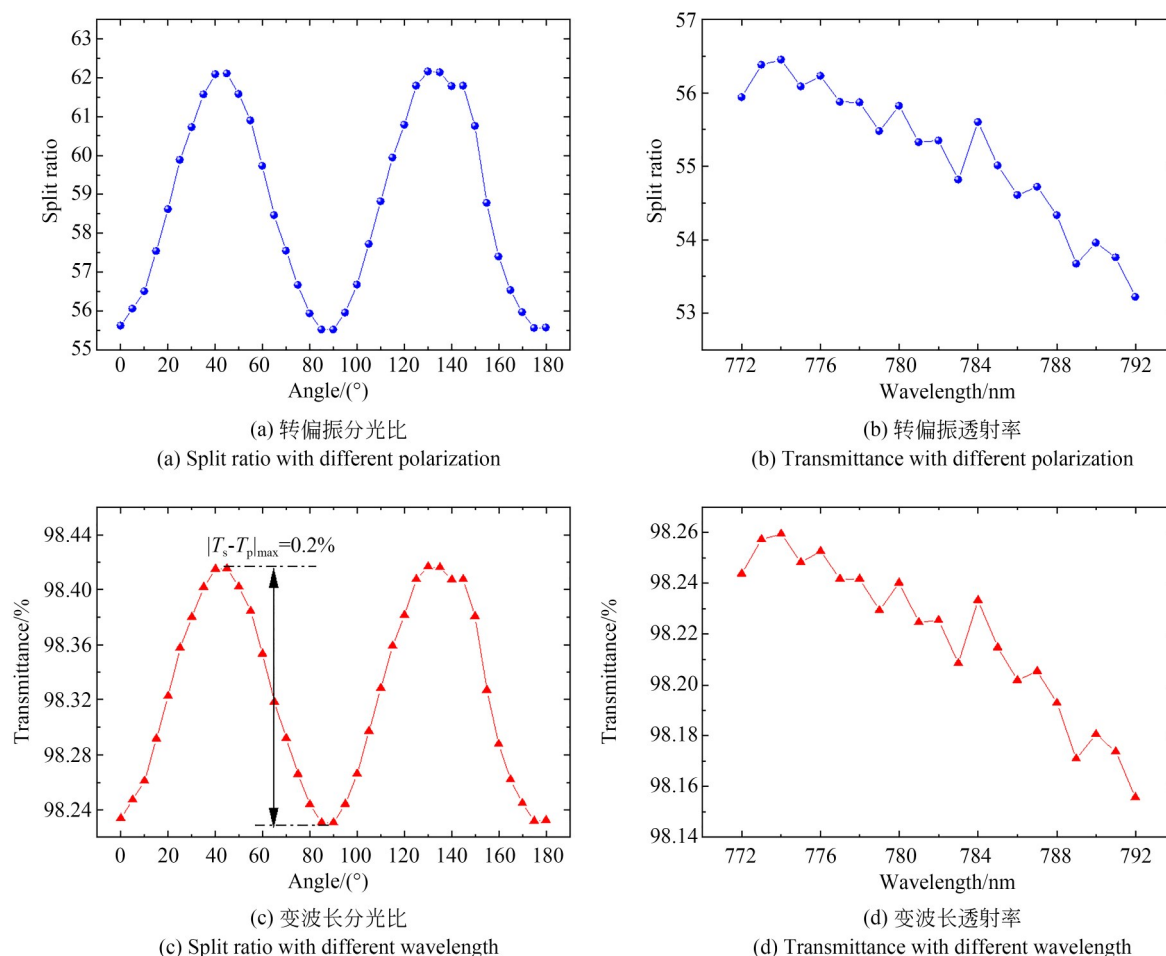


图 5 实验测量结果

Fig. 5 Experimental measurement results

透射率光谱,从图中可看出,对不同偏振方向的偏振光,该消偏振分光片的透射率保持在 98.23%~98.42% 之间。由于 s 偏振光与 p 偏振光在偏振测量范围之间,故其透射率偏差不会超过测量透射率结果的变化幅值,说明在 780 nm 的分光条件下该分光片的透射率最大偏差 $|T_s - T_p|_{\max}$ 在 0.2% 以下。此处测得的透射率相比分光光度计的测量结果稍高,这是由于实测透射率是用透射功率与反射功率之间的关系式 $T/(T+R)$ 求得,计算过程中忽略了光的损耗、散射及吸收等情况,导致计算所用总功率偏低,实测透射率相比分光光度计的测量结果更高。

然后,对消偏振分光片进行变波长实验。所用激光器可调谐,测试前先调整偏振光角度,使透射率达到最小,即调整至最小偏振角。随后,

改变输出激光波长,由于激光器波长可调谐范围有限,故设置实验波长为 772~792 nm。测试时,激光波长逐渐增大,步长为 1 nm,记录分光片透射功率与反射功率,得到分光片的分光比及透射率随波长的变化结果,如图 5(b)与 5(d)所示。从图中可看出,分光片透射率随着波长的增大有微小的下降趋势,稳定在 98.15%~98.26% 之间,波动小于 0.12%,而分光比波动在 53~57,故可认为该消偏振分光片在工作波段具有较为稳定的分光性能,其分光比与透射率在工作波段基本不随波长的变化而改变。

为了测试该分光片的长时间稳定性,同样调整偏振光方向,使透射率达到最小,之后将该分光片放置于光路中进行 10 h 的长时间实验,实验环境温度恒定,结果如图 6 所示。从测试结果可

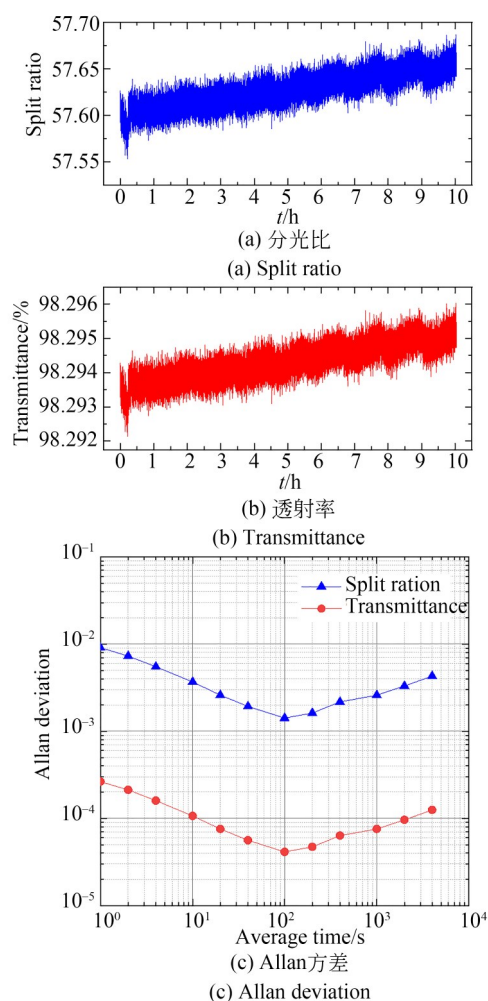


图6 长时间测试结果

Fig. 6 Long-term stability test

以看到,分光比稳定在 57.55~57.70,波动幅度小于 0.2,透射率稳定在 98.292%~98.296%,波动幅度为 0.004%,但具有一个缓慢上升的趋势,该趋势可能与激光器本身的功率漂移有关。对长时间稳定性测量结果进行 Allan 方差分析,结果如图 6(c)所示,当平均时长为 100 s 时,长时分光比与长时透射率的 Allan 方差最小,分别为 1.41×10^{-3} 和 4.12×10^{-5} 。该结果说明长时透射率相较于长时分光比具有更好的功率稳定度。

4 结 论

本文设计了多层消偏振膜系,并镀制了 750~810 nm 波段的消偏振分光片,在工作波段具有稳定的分光比,s 偏振光与 p 偏振光的透射率为 98%,透射率偏差小于 0.2%。通过改变入射光偏振方向与波长测量消偏振分光片的分光比及透射率,实验结果验证了该分光片在工作波段具有良好的消偏振性能。此外,对该分光片进行了长时间的性能测试,验证了该分光片具有良好的长时稳定性。本文设计与制备的高分光比消偏振分光片在光学测试计量和量子传感探测等精密测量领域中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] QI H J, SHAO J D, HONG R J, *et al.* Non-polarizing beam splitter design [J]. *Europhysics Letters (EPL)*, 2004, 67(5): 859-865.
- [2] QI H J, HONG R J, YI K, *et al.* Nonpolarizing and polarizing filter design [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(12): 2343.
- [3] QI H J. Birefringent non-polarizing thin film design [J]. *Science in China Series E*, 2005, 48(1): 61.
- [4] GU P F, ZHENG Z R. Design of non-polarizing thin film edge filters [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2006, 7(6): 1037-1040.
- [5] WANG Z, SHI J, HUANG Z J. Research on infrared non-polarizing beam splitters [J]. *Proceedings of the Proc SPIE*, 2006, 6149: 61491O.
- [6] 包佳祺,刘祥彪,俞侃. 长波通截止滤光片的消偏振设计 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10s): 82-86.
- [7] BAO J Q, LIU X B, YU K. Design of non-polarization long-wave-pass edge filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10s): 82-86. (in Chinese)
- [8] 邓元龙,李学金,耿优福,等. 非偏振分光镜对干涉式椭圆仪测量精度的影响 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2373-2379.
- [9] DENG Y L, LI X J, GENG Y F, *et al.* Influence of nonpolarizing beam splitters on measurement accuracy in interferometric ellipsometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2373-2379. (in Chinese)
- [10] JIAO H F, NIU X S, ZHANG X M, *et al.* Design and fabrication of a superior nonpolarizing long-wavelength pass edge filter applied in laser beam combining technology [J]. *Applied Optics*, 2020, 59

- (5): A162.
- [9] 潘永刚, 张四宝, 刘政, 等. 偏振和位相调控分光膜的设计与制备[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(5): 3788/IRLA20210512.
- PAN Y G, ZHANG S B, LIU ZH, *et al.* Design and preparation of polarization and phase-controlled spectrophotometer film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 3788/IRLA20210512. (in Chinese)
- [10] HORODYNSKI M, KÜHMAYER M, FERISE C, *et al.* Anti-reflection structure for perfect transmission through complex media [J]. *Nature*, 2022, 607(7918): 281-286.
- [11] WANG J, HUANG G Y, WANG G C, *et al.* One-thousandth-level laser power stabilization based on optical feedback from a well-designed high-split-ratio and nonpolarized beam splitter[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(25): 7798-7803.
- [12] COSTICH V R. Reduction of polarization effects in interference coatings[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(4): 866-870.
- [13] GILO M. Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(25): 5345-5349.
- [14] WANG W L, XIONG S M, ZHANG Y D. Design and analysis of all-dielectric broadband nonpolarizing parallel-plate beam splitters [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3185-3188.
- [15] WANG W. Design of nonpolarizing antireflection coating by using multiobjective optimization algorithm[J]. *Optik*, 2013, 124(16): 2482-2486.
- [16] 王文梁, 熊胜明, 张云洞. 光学薄膜消偏振技术及进展[J]. 光学仪器, 2007, 29(5): 75-79.
- WANG W L, XIONG SH M, ZHANG Y D. The progress of non-polarizing technology in optical thin film [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(5): 75-79. (in Chinese)
- [17] WANG Z P, SHI J H, RUAN S L. Designs of infrared non-polarizing beam splitters [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(2): 394-399.
- [18] 王文梁. 近红外消偏振分光膜设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3275-3278.
- WANG W L. Design of near-infrared non-polarizing beam splitter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3275-3278. (in Chinese)
- [19] TIKHONRAVOV A, TRUBETSKOV M. Development of the needle optimization technique and new features of OptiLayer design software [J]. *Proc SPIE*, 1994, 2253.
- [20] PENG G L, YANG J K, JIA H H, *et al.* Design of optical thin film systems for ultraviolet narrow-band interference filters based on needle optimization technique[C]. *Proc SPIE 6781, Passive Components and Fiber-Based Devices IV*, 2007, 6781: 416-426.
- [21] 俞侃, 包佳祺. 基于等效层理论的薄膜滤光片中心波长消偏振膜系设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 45-49.
- YU K, BAO J Q. Design of thin film filter central wavelength depolarization stack based on equivalent layers theory[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 45-49. (in Chinese)
- [22] 庄秋慧, 刘国军, 付秀华, 等. 工作波段覆盖近紫外到近红外波的消偏振分色片的设计与研制[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1131001.
- ZHUANG Q H, LIU G J, FU X H, *et al.* Design and development of depolarization color separator covering near ultraviolet to near infrared waves in working band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1131001. (in Chinese)

作者简介:



王国超(1985—),男,湖北天门人,博士,讲师,2010年、2015年于国防科技大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光学频率梳精密测量与计量、量子精密测量和光子集成芯片等方向的研究。E-mail: wgc.19850414@163.com