



## 偏振和位相调控分光膜的设计与制备

潘永刚 张四宝 刘政 刘文成 李绵 张春娟 罗长新

### Design and fabrication of polarization and phase modulated beam splitter

Pan Yonggang, Zhang Sibao, Liu Zheng, Liu Wencheng, Li Mian, Zhang Chunjuan, Luo Changxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IHLA20210512>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 缺陷诱导光学薄膜光场增强损伤分析

Analyses of light field enhancement damage induced by defects in optical thin films

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20210357 <https://doi.org/10.3788/IHLA20210357>

#### 光学表面粒子污染物散射的单层薄膜调控特性

Single-layer film regulation characteristics of particle pollutant scattering from optical surfaces

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210234 <https://doi.org/10.3788/IHLA20210234>

#### 倒梯形双层金属光栅式偏振分束器

Polarization beam splitter with inverted trapezoidal double-layer metal grating

红外与激光工程. 2019, 48(3): 320002 <https://doi.org/10.3788/IHLA201948.0320002>

#### 短中波红外探测系统宽波段高透过率薄膜

Short-medium infrared detection system broadband high transmittance film

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1017001 <https://doi.org/10.3788/IHLA201948.1017001>

#### 基于全局拓扑优化深度学习模型的超构光栅分束器

Global topology optimized metagrating beam splitter based on deep learning

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20211028 <https://doi.org/10.3788/IHLA20211028>

#### 多金属层诱导透射紫外“日盲”探测成像滤光片设计与低温制备研究

Design and the preparation of multi metal layer induced transmission UV “solar blind” filter at low temperature for detection imaging

红外与激光工程. 2018, 47(9): 920002 <https://doi.org/10.3788/IHLA201847.0920002>

## 偏振和位相调控分光膜的设计与制备

潘永刚<sup>1</sup>, 张四宝<sup>2</sup>, 刘政<sup>2</sup>, 刘文成<sup>2</sup>, 李绵<sup>2</sup>, 张春娟<sup>2</sup>, 罗长新<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 中山研究院, 广东 中山 528437;  
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 偏振和位相调控分光膜是自由空间量子通信系统中不可缺少的光学元件, 其性能直接影响通信质量, 决定通信误码率。基于等效层设计理论, 采用“介质+金属+介质”的特殊膜系结构, 选用 Ag 金属和 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 三种介质膜料作为镀膜材料, 实现石英衬底 45°入射时, 1500~1600 nm 波段消偏振平均透射/反射比为 8.5:91.5, 在 1530、1540、1550、1560 nm 控制位相的分光膜。采用电子束蒸发离子辅助沉积技术, 优化沉积工艺, 制备了分光膜样品。检测结果表明: 在 45°入射条件下, 1500~1600 nm 波段光谱平均透射/反射比为 8.53:91.47, 在 1530、1540、1550、1560 nm 处透射光位相差控制在 5.02°以内, 反射光位相差控制在 8.05°以内, 满足通信系统分光比及位相控制的要求。此外, 该分光膜通过了相应的环境试验测试, 满足可靠性要求。

**关键词:** 光学薄膜; 分光膜; 消偏振; 位相; 等效层

中图分类号: O484 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210512

## Design and fabrication of polarization and phase modulated beam splitter

Pan Yonggang<sup>1</sup>, Zhang Sibao<sup>2</sup>, Liu Zheng<sup>2</sup>, Liu Wencheng<sup>2</sup>, Li Mian<sup>2</sup>, Zhang Chunjuan<sup>2</sup>, Luo Changxin<sup>2</sup>

(1. Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Techbology, Zhongshan 528437, China;  
2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Polarization and phase controlled beam splitter is an indispensable optical element in free space quantum communication system. Its performance directly affects the communication quality and determines the communication error rate. Based on the theory of equivalent layer design, the special film structure of "dielectric+metal+dielectric" is adopted, and Ag metal material and SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dielectric material are selected to realize 45° incident angle on quartz substrate, and the average transmittance/reflectance ratio is 8.5: 91.5 in the wavelength range from 1500 nm to 1600 nm. Phase is controlled at 1530, 1540, 1550, 1560 nm. By optimizing the deposition process, the splitter film samples are prepared by electron beam evaporation with ion assisted technology. The test results show that the average transmittance/reflectance ratio is 8.53: 91.47 in the wavelength range of 1500-1600 nm under the condition of 45° incidence. The transmitted phase difference controlled within 5.02° and the reflected phase controlled with 8.05° in the range of 1530, 1540, 1550, 1560 nm, which meets the requirements of spectral energy splitting ratio and phase control of communication system. In addition, the film passed the corresponding environmental test, which meets the reliability requirements.

**Key words:** optical thin film; beam splitter; elimination polarization; phase; equivalent layer

收稿日期:2021-12-01; 修订日期:2022-01-15

基金项目:中国科学院自研项目(Y490771C01)

作者简介:潘永刚,男,博士,主要从事光学薄膜方面的研究。

## 0 引言

量子通信是利用量子叠加态和纠缠效应进行信息传递的新型通信方式, 基于量子力学中的不确定性、测量坍缩和不可克隆三大原理提供无法窃听和计算破解的绝对安全性保证, 主要分为量子隐形传态和量子密钥分发两种。量子隐形传态目前处于理论和实验探索阶段, 离实用尚有很大差距; 量子密钥分发, 借量子叠加态的传输测量实现通信双方安全的量子密钥共享, 采用一次一密的对称加密体制, 即通信双方均使用与明文等长的密码进行逐比特的加解密操作, 实现无条件的绝对安全的保密通信, 分光膜是量子密钥分发系统中一种重要光学元件。当光倾斜入射到普通分光膜元件时, 将会产生 S 偏振光和 P 偏振光分离, 入射角度越大, 分离量越大, 产生的偏振效应越强, 同时也会产生严重的位相差, 将影响量子密钥分发系统的性能, 造成严重的误码率<sup>[1]</sup>, 因此, 需要通过光学薄膜元件偏振和位相调控技术进行抑制, 研制能够满足位相和偏振要求的分光膜元件, 对整个系统意义重大。国内外在偏振和位相调控技方面展开了相关研究, V R Costich 通过不同折射率匹配设计消偏

$$M_{pq} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_q & i\sin\delta_q/\eta_q \\ i\eta_q\sin\delta_q & \cos\delta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_p & i\sin\delta_p/\eta_p \\ i\eta_p\sin\delta_p & \cos\delta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_q & i\sin\delta_q/\eta_q \\ i\eta_q\sin\delta_q & \cos\delta_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $M$  表示特征矩阵符号;  $\delta_q$  表示 q 层的位相厚度;  $\delta_p$  表示 p 层的位相厚度;  $\eta_q$  表示 q 层的有效导纳;  $\eta_p$  表示 p 层的有效导纳。

由于对称膜系的特征矩阵和单层膜的特征矩阵具有相同的性质, 可表示为:

$$E_{pq} = \eta_q \left[ \frac{\sin 2\delta_q \cos \delta_p + \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_q}{\eta_p} + \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \cos 2\delta_q \sin \delta_p - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_q}{\eta_p} - \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \sin \delta_p}{\sin 2\delta_q \cos \delta_p + \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_q}{\eta_p} + \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \cos 2\delta_q \sin \delta_p + \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_q}{\eta_p} - \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \sin \delta_p} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\Gamma = \arccos \left[ \cos 2\delta_q \cos \delta_p - \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_q}{\eta_p} + \frac{\eta_p}{\eta_q} \right) \sin 2\delta_q \sin \delta_p \right] \quad (4)$$

## 1.2 膜系设计

分光膜系设计的基本原则是在确定的衬底材料表面, 使用最少的膜层, 实现分光比要求, 同时满足薄膜材料与衬底之间及薄膜材料之间的应力匹配, 保证薄膜元件的可靠性。根据表 1 所示的分光膜技术要

求的分束器<sup>[2]</sup>, 顾培夫等人利用宽带 F-P 消偏振特性, 设计长/短波通截至滤光片<sup>[3]</sup>, 马小风等人设计偏振效应可调的减反射膜<sup>[4]</sup>, 但是针对文中研究的宽波段特殊分光比的消偏振位相调控膜没有找到相应的文献报道, 具有一定研究价值。

## 1 膜系设计与制备

基于空间量子通信的技术要求进行分光膜系的设计, 允许有一定的吸收, 具体技术要求如表 1 所示。

表 1 分光膜的技术要求

Tab.1 Technical requirements of beam splitter

Average $T:R@1500-1600\text{ nm}$	$(8\pm 2):(92\pm 2)$
$ T_s - T_p $ and $ R_s - R_p $	$\leq 3\%$
$ \Delta_t  @ 1530\text{ nm}, 1540\text{ nm}, 1550\text{ nm}, 1560\text{ nm}$	$\leq 7^\circ$
$ \Delta_r  @ 1530\text{ nm}, 1540\text{ nm}, 1550\text{ nm}, 1560\text{ nm}$	$\leq 10^\circ$

### 1.1 理论依据

文中采用对称膜系的等效层设计理念<sup>[5-6]</sup>, 以膜系 (qpq) 为例, 来解释对称膜系在数学上存在等效层的概念。对称膜系特征矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Gamma & i\sin\Gamma/E \\ i\sin\Gamma & \cos\Gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $E$  为等效折射率;  $\Gamma$  为等效位相厚度。

因此, 对称膜系 (qpq) 可以用等效单层膜来描述, 该等效层的等效折射率  $E$  和等效位相厚度  $\Gamma$  可以由以下公式确定:

求, 采用“介质+金属+多层介质膜”的复合结构, 其示意图如图 1 所示, 实现宽光谱能量的分光及位相调控。根据以上原则, 偏振和位相调控分光膜的设计方法如下: (1) 考虑薄膜材料的透明区、折射率、吸收系数及应力匹配, 选择 4 种不同折射率的薄膜材料, 其中 J 代表金属材料, H、M 及 L 分别代表高、中、低折射率介质薄膜材料; (2) 在薄膜材料确定的情况下, 改

变层数和厚度, 可以得到不同等效位相  $\Gamma$  和等效折射率  $E$ , 故可以采用 MJM 和 HLH 这样的对称膜系结构, 初始膜系结构为: G|MJM HLH|AIR, 其中 G 代表衬底, AIR 代表空气。为满足 1500~1600 nm 波段光谱要求及偏振和位相的调控, 可在初始膜系结构最外层增加 L 有利于优化设计, 此时初始膜系结构变为: G|MJM HLHL|AIR。(3) 设定优化目标。采用 Simplex 和 Quasi Newton 等多种优化方式, 对各层薄膜厚度反复优化迭代, 得到最终的优化结果。采用该方法可以在常见的光学玻璃材料上, 获得较好的分光膜优化结果。

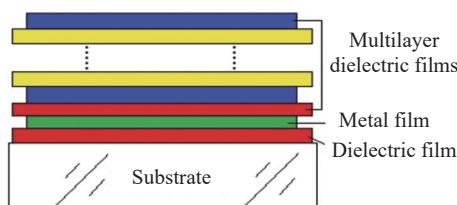


图 1 分光膜结构示意图

Fig.1 Structure diagram of beam splitter structure

金 (Au)、银 (Ag)、铝 (Al) 等是薄膜制备常采用的金属材料, 其中 Ag 膜是已知金属材料中偏振效应最小<sup>[7-8]</sup>, 可优先选择。对于介质薄膜材料的选择, 需要充分考虑光学特性, 应力匹配等因素, 选择  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  三种介质薄膜材料<sup>[9-12]</sup>, 用于分光膜偏振和位相的调控。基于以上设计方法和镀膜材料选择, 采用 Essential Macleod 膜系设计软件, 参考波长 1700 nm, 入射角度 45°, 对基础膜系进行优化, 优化结果为 G|0.37444 M0.00438 J0.04772 M 0.07484 H0.19293 L0.22524 H0.25465 L|AIR, M 代表  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , J 代表 Ag, H 代表  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , L 代表  $\text{SiO}_2$ , 理论设计光谱透过率曲线如图 2 所示, 光谱反射率曲线如图 3 所

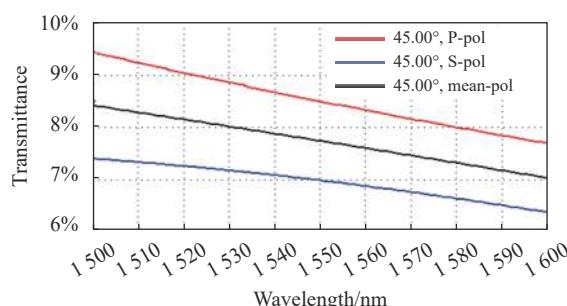


图 2 光谱透过率曲线

Fig.2 Spectral transmittance curve

示, 透射位相如图 4 所示, 反射位相如图 5 所示。

由图 2 和图 3 可知, 在 1500~1600 nm 平均  $T:R$  为 8.5:91.5, P 光平均透过率 8.53%, S 光平均透过率 6.94%, P 和 S 透过光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 2.04%; P 光平均反射率 87.93%, S 光平均反射率 89.51%, P 和 S 反射光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 2.16%。由图 4 和图 5 可知, 在 1530、1540、1550、1560 nm 处, P 光和 S 光透过位相差分别为 3.4°、3.9°、4.4° 和 4.9°, P 光和 S 光反射位相差分别为 4.6°、

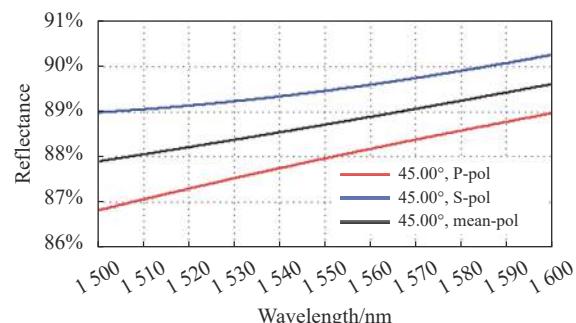


图 3 光谱反射率曲线

Fig.3 Spectral reflectance curve

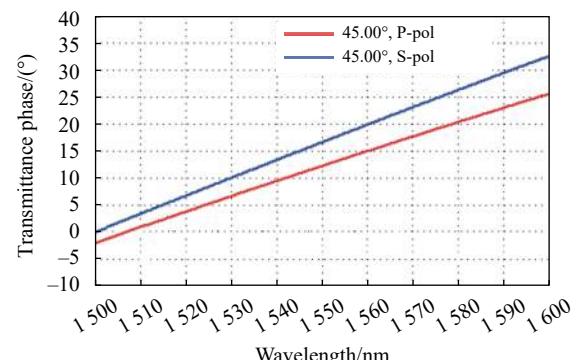


图 4 透射位相

Fig.4 Transmission phase

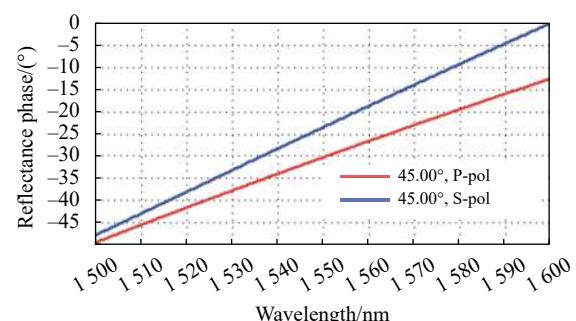


图 5 反射位相

Fig.5 Reflection phase

5.7°、6.8°和 7.9°，满足分光膜的技术要求。

### 1.3 入射角度容差分析

图 6 和图 7 分别给出 40°、45°与 50°入射时，S 光、P 光和平均光谱透过率曲线和光谱反射率曲线。

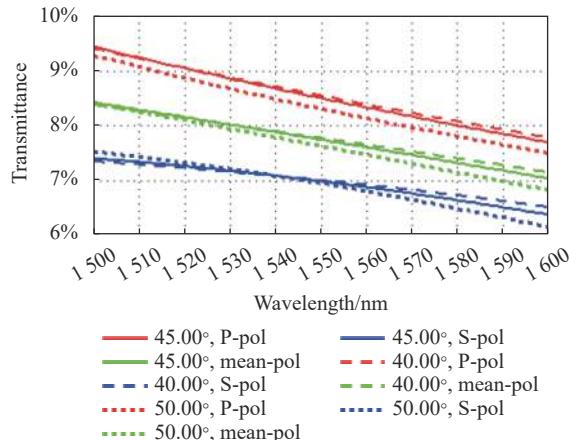


图 6 不同入射角光谱透过率曲线

Fig.6 Spectral transmittance curve of differnt incident angles

由图 6 和图 7 可以看出，40°入射时，在 1500~1600 nm 平均  $T:R$  为 8.06:91.94，P 光平均透过率 8.57%，S 光平均透过率 6.97%，P 和 S 透过光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 2.06%；P 光平均反射率 87.73%，S 光平均反射率 89.51%，P 和 S 反射光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 2.33%；50°入射时，在 1500~1600 nm 平均  $T:R$  为 7.89:92.11，P 光平均透过

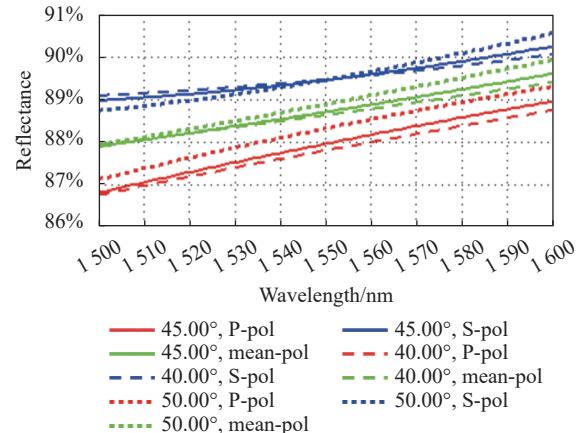


图 7 不同入射角光谱反射率曲线

Fig.7 Spectral reflectance curve of differnt incident angles

率 8.34%，S 光平均透过率 6.90%，P 和 S 透过光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 1.76%；P 光平均反射率 88.29%，S 光平均反射率 89.55%，P 和 S 反射光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 1.67%。与 45°入射时相比，透/反射比及 S-P 光最大分离量变化都较小。因此，该膜系结构对入射角度的变化不敏感，适合大角度变化的膜系设计。

### 1.4 薄膜制备

分光膜的制备在 Leybold ARES1350 型真空镀膜设备上完成，Ag、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  均采用电子束蒸发离子辅助沉积方式 (APSpro 源)，由石英晶体控制膜层的沉积速率和厚度，制备工艺参数如表 2 所示。

表 2 制备工艺参数

Tab.2 Preparation process parameters

Material	Rate/nm·s <sup>-1</sup>	EB oxygenation/sccm	APS	
			Bias voltage/V	Discharged current/A
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3	0	100	45
Ag	1	0	30	20
$\text{Ta}_2\text{O}_5$	0.3	35	130	50
$\text{SiO}_2$	0.8	10	160	55

镀膜前，先对样片进行超声波清洗，然后采用酒精、乙醚混合液擦拭脱水后放入真空室。烘烤温度 80 °C，工件架转速 20 rad/min，当真空度抽至  $1.0 \times 10^{-5}$  mbar 时，打开 APS 源对样片表面进行镀前离子束清洗 200 s，目的是清洗样片表面，并在表面形成伪扩散层，有利于提高衬底与膜层之间的结合力。镀膜

过程 APS 源充入氩气，gas1 和 gas2 分别为 4 sccm 和 10 sccm，当真空度到  $8.5 \times 10^{-6}$  mbar 时，开始薄膜沉积。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 光谱检测结果

实际制备的样品如图 8 所示，采用 Carry7000 测

得光谱透过率曲线如图 9 所示, 光谱反射率曲线如图 10 所示。

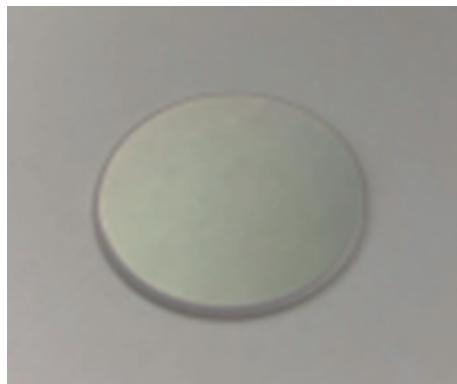


图 8 样品图

Fig.8 Sample picture

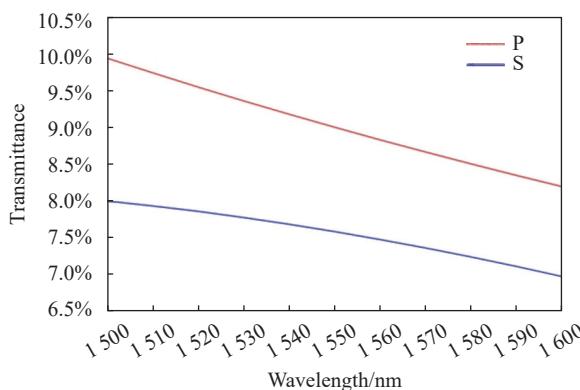


图 9 实测光谱透过率曲线

Fig.9 Measured spectral transmittance curve

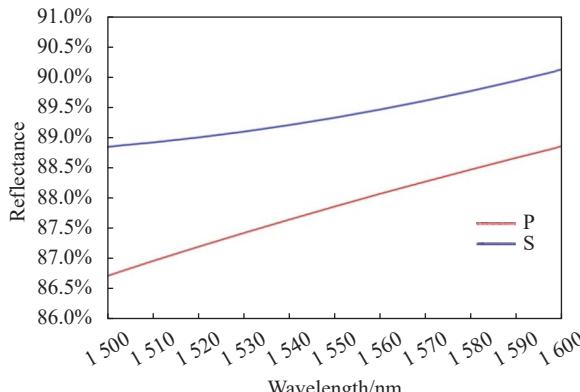


图 10 实测光谱反射率曲线

Fig.10 Measured spectral reflectance curve

由图 9 和图 10 可知, 在 1500~1600 nm 波段, P 光平均透过率 9.01%, S 光平均透过率 7.52%, P 和

S 透过光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 1.94%, P 光平均反射率 87.81%, S 光平均反射率 89.41%, P 和 S 反射光谱在 1500 nm 处存在最大分离量 2.14%, 平均 T:R 为 8.53: 91.47。

## 2.2 位相差测试

通过光的电磁场理论, 可以推导出 S、P 偏振光所引起的位相差  $\delta$  与椭圆偏振光消光比 (ER) 的关系为<sup>[13]</sup>:

$$\delta = \pm 2\arctan \sqrt{\frac{1}{ER}}(ER1) \quad (5)$$

由公式 (5) 可知, 测得偏振消光比即可获得 S、P 偏振光所引起的位相差。文中采用旋转检偏器直接测量的方法, 测得透射光/反射光的消光比。测量原理示意图如图 11 所示。

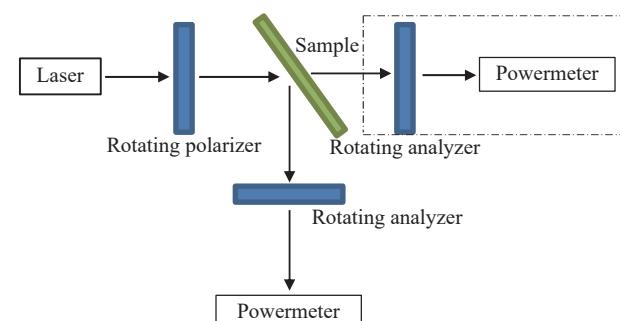


图 11 消光比测量原理示意图

Fig.11 Schematic diagram of extinction ratio measurement principle

如图 11 所示, 测量时分别采用 1530、1540、1550、1560 nm 激光器作为输入光源, 激光束经过旋转起偏器后, 以 45°角入射在样品表面, 经由样品表面透射 (或反射), 再通过旋转检偏器, 最后由功率计接收。当入射光主偏正分量与检偏器主轴重合时, 功率计获得最大功率 ( $I_{max}$ ); 当入射光主偏正分量与检偏器主轴垂直时, 功率计获得最小功率 ( $I_{min}$ ), 样品的消光比可以通过公式 (6) 计算得出:

$$ER = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad (6)$$

实测得到的消光比数据和结合公式 (5) 计算获得位相差如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 在 1530、1540、1550、1560 nm 处, P 光和 S 光透过位相差分别为 3.5°、4.01°、4.41°和 5.02°, P 光和 S 光反射位相差分别为 4.76°、5.89°、6.95°和 8.05°, 与理论设计位相差基本一致, 满

表 3 消光比和位相差数据

Tab.3 Extinction ratio and phase difference date

$\lambda/\text{nm}$	$I_{\max}/\text{mW}$		$I_{\min}/\text{mW}$		$ER$		$\delta/(\text{°})$	
	$T$	$R$	$T$	$R$	$T$	$R$	$T$	$R$
1 530	0.43	4.24	$0.402 \times 10^{-3}$	$7.323 \times 10^{-3}$	1 070:1	579: 1	3.5	4.76
1 540	0.41	4.31	$0.502 \times 10^{-3}$	$11.402 \times 10^{-3}$	817:1	378: 1	4.01	5.89
1 550	0.40	4.37	$0.593 \times 10^{-3}$	$16.125 \times 10^{-3}$	675:1	271: 1	4.41	6.95
1 560	0.38	4.43	$0.731 \times 10^{-3}$	$21.931 \times 10^{-3}$	520:1	202: 1	5.02	8.05

足技术使用要求。

### 2.3 环境试验测试

为满足量子通信系统中元件可靠性要求, 对样品进行了以下 5 项可靠性试验, 试验结果如表 4 所示, 试验内容如下。

表 4 分光膜可靠性试验结果

Tab.4 Reliability results of beam splitter

Test items	Results
Adhesion test	Pass
Soaking test	Pass
Heat and humidity test	Pass
Alternating high and low temperature test humidity and temperature	Pass

(1) 附着力测试: 利用粘性强度大于  $3 \text{ N/cm}^2$  的 3 M 胶带紧贴样品膜层表面, 沿膜层表面垂直以  $25 \text{ mm/s}$  的速度拉起, 观察膜层是否脱落。

(2) 浸泡实验: 在  $(45 \pm 1)^\circ\text{C}$  的水中浸泡 8 个小时, 观察膜层是否脱落。

(3) 高低温试验: 在  $(85 \pm 2)^\circ\text{C}$  大气中保持 6 h, 观察膜层是否脱落; 在  $(-55 \pm 3)^\circ\text{C}$  大气中保持 16 h, 观察膜层是否脱落。

(4) 高低温循环试验: 以约  $1^\circ\text{C/min}$  升温至  $70^\circ\text{C}$ , 在  $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$  环境中保持 2 h, 再以约  $1^\circ\text{C/min}$  降温至  $-50^\circ\text{C}$ , 在  $(-50 \pm 3)^\circ\text{C}$  环境中保持 2 h, 再以约  $1^\circ\text{C/min}$  升温至  $70^\circ\text{C}$ , 循环 5 个周期, 观察膜层是否脱落。

(5) 湿热试验: 在相对湿度  $90\%$  温度为  $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$  大气中保持 16 h, 观察膜层是否脱落。

实验结果表明, 研制的偏振和位相调控分光膜满足量子通信系统对光学薄膜可靠性的要求。

### 2.4 测试结果分析

所研制的分光膜光谱曲线和位相差虽然都满足

技术要求, 但与理论设计结果存在一定的差异。这些主要是由于非规整膜系优化设计时, 为了满足光谱及位相要求, 优化

所得的膜层厚度差异大, 部分膜层厚度过薄或过厚, 膜厚监控易产生误差, 另外, 石英晶体控制膜厚时误差在多层膜监控时逐渐积累, 无法得到补偿, 也会导致实际制备结果出现偏差。另外, Ag 材料对蒸发工艺比较敏感, 特别是真空度和蒸发速率, 当工艺条件稍有改变时, Ag 膜折射率色散、消光系数及聚集密度有大的变化, 从而使得光谱曲线及位相出现差异。这些也是导致偏振和位相调控分光膜研制的难点所在, 因此, 在设计时就应考虑监控、误差累积对性能的影响, 确保工艺体条件能够重复稳定也尤为重要。

## 3 结 论

偏振和位相调控分光膜选用  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SiO}_2$  及 Ag 作为镀膜材料, 基于介质加金属的膜系设计结构, 采用电子束蒸发离子辅助沉积制备工艺, 实现了在  $1500\sim1600 \text{ nm}$  波段特定比例消偏振分光, 在  $1530 \text{ nm}$ 、 $1540 \text{ nm}$ 、 $1550 \text{ nm}$  及  $1560 \text{ nm}$  位相差得到控制, 在量子通信系统中得到应用。所制备的分光膜通过相应的环境试验, 验证了薄膜的可靠性。该分光膜在设计与制备中涉及的特殊工艺环节对其他偏振分光膜的研究有一定的参考价值, 但是研制过程中存在一定的问题, 如何进一步提高金属介质膜系结构的控制精度及重复性是下一步工作的重点。

## 参 考 文 献:

- [1] Duan Weibo, Li Daqi, Liu Baojian, et al. Effects of spatial atomic oxygen on polarization contract of polarization-maintaining mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1131001. (in Chinese)

- [2] Costich V R. Reduction of polarization effects in interference coating [J]. *Appl Opt*, 1970, 9(4): 866-870.
- [3] Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang, et al. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing (DWDM) thin film filters used in tilted incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 377-380. (in Chinese)
- [4] Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan, et al. Design of non-polarizing broadband antireflection coating suing equivalent layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 563-566. (in Chinese)
- [5] Tang Jinfia, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 43-48. (in Chinese)
- [6] Xu Jiangfa, Chen Qiuling. Anti-reflection coating designed by genetic algorithm [J]. *Chinese of Lasers*, 2007, 34(9): 1271-1275. (in Chinese)
- [7] Macleod H A. Thin-film Optical Filters[M]. Tucson: CRC Press, 1999.
- [8] Zhong Disheng. Vacuum Deposition[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001. (in Chinise)
- [9] Duan Weibo, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Study on optical properties of two thin film materials in medium-wave infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 177-180. (in Chinese)
- [10] Wang S W, Liu D Q, Lin B, et al. Realization of integrated narrow bandpass filters in the infrared region [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 25(11): 1677-1683.
- [11] Bai Jinlin, Jiang Yugang, Wang Lishuang, et al. Study on the design and preparation technology of ultra-low profile wideband high reflection thin films [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200413. (in Chinese)
- [12] Jiang Yugang, Liu Xiaoli, Liu Huasong, et al. Effects of aging treatment on properties of SiO<sub>2</sub> thin films with different deposition technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0521001. (in Chinese)
- [13] Max B, Emil W. Principle of Optics[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 21-25. (in Chinese)