

偏振和相位调控反射镜的设计与制备

余德明^{1,2*}, 段微波², 李大琪², 刘保剑², 陈刚², 洪瑞金¹

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 运用等效层理论,设计了一种目标波长分别为 780,810,850 nm,在 45°入射角下使用的反射镜,该反射镜在保证膜层高反射率的同时实现了对偏振和相位的调控。为了在较宽波段上满足平均反射率高的要求,选用金属银和 Ta₂O₅、SiO₂ 作为光学薄膜的材料。采用电子束蒸发和热蒸发方式并配合石英晶体振荡监控膜厚等工艺,在 JGS-1 石英基底上获得了 500~1600 nm 波段范围内平均反射率大于 95%,目标波长下消光比分别优于 3000:1、5000:1 和 7000:1 的反射镜膜系。所设计的反射镜可以满足空间环境下量子通信应用的可靠性要求。

关键词 薄膜; 反射镜; 偏振; 相位

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1531001

Design and Fabrication of Polarization- and Phase-Modulated Mirror

Yu Deming^{1,2*}, Duan Weibo², Li Daqi², Liu Baojian², Chen Gang², Hong Ruijin¹

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract In this study, the equivalent film theory is used to develop a polarization- and phase-modulated mirror with target wavelengths of 780, 810, and 850 nm and an incidence angle of 45°. Apart from achieving polarization and phase modulation, the obtained mirror can ensure the high reflectivity of the thin films. A metallic material (Ag) and two dielectric thin film materials (such as Ta₂O₅ and SiO₂) are selected as the film materials to obtain high reflectance over a wide waveband. The mirror film system is fabricated on an optical glass substrate (JGS-1) using the electron beam evaporation, thermal evaporation, and quartz crystal oscillation monitoring technologies. The measured spectra of the mirror film system denote that the average reflectance is greater than 95% in the wavelength range of 500–1600 nm and the extinction ratios at the target wavelengths exceed 3000:1, 5000:1, and 7000:1. Thus, the proposed mirror satisfies the reliability requirement associated with space-to-ground quantum communication.

Key words thin films; mirror; polarization; phase

OCIS codes 310.1210; 310.5448; 310.6860

1 引 言

量子通信是一门研究以量子为载体传递和处理信息的科学,这种通信方式可使信息的传输变得更加高效与安全。目前,量子密钥分发技术已发展成熟,并实现了工程化应用。反射镜是空间量子密钥分发实验光学系统中的一种重要光学元件,具有高效传输光学能量和折转光路等作用,但它在倾斜入射条件下使用时,会产生严重的偏振效应和相位差,

从而造成了极高的量子通信误码率^[1]。在保证较高反射率的前提下,能满足偏振与相位可调要求的反射镜,对于整个光学系统尤为重要。

光在倾斜射入光学薄膜时,会不可避免地产生 p 偏振光和 s 偏振光两种分离量。p 偏振光和 s 偏振光分离得越大,产生的偏振效应越强烈,光学系统的性能被破坏得越严重^[2],因此,必须通过偏振调控技术对薄膜元件的偏振效应进行抑制。国内外在偏振调控技术方面开展了很多研究,如:Thelen 和

收稿日期: 2019-11-19; 修回日期: 2020-04-22; 录用日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61605229)

* E-mail: steven-deming@hotmail.com

Seeley 在 20 世纪 80 年代通过不同的方法分别设计了消偏振分色片^[3]; 浙江大学的顾培夫等^[4]利用宽带法布里-珀罗薄膜干涉滤光片的消偏振特性, 设计了长波和短波通截止滤光片; 中国科学院上海技术物理研究所^[2-3]针对航天任务的应用, 设计了多种偏振效应可调的分色片和减反射膜。

2 反射镜膜系设计

反射镜需要根据空间量子通信应用的要求, 在 45°入射角及目标波长(780, 810, 850 nm)下实现反射能量、偏振效应、相位的可调控。在 500 ~ 1600 nm 波段范围内, 反射镜膜系的平均反射率应大于 95%, 目标波长下的消光比应分别优于 3000:1, 5000:1 和 7000:1, 相位差应分别小于 2.09°、1.62°和 1.37°。

2.1 反射膜设计

光在金属膜中传播时具有傍轴倾向, 因此, 不论进入金属膜时的入射角有多大, 其偏振效应小于一的介质膜。金属膜 p 偏振光的最小反射率可以近似表示为^[5]

$$R_{pmin} \approx \left[\frac{k/n}{1 + \sqrt{1 + (k/n)^2}} \right]^2, \quad (1)$$

式中: k 为消光系数; n 为折射率。偏振效应的量化指标——偏振度 P 的计算公式为^[6]

$$P = \left| \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \right|, \quad (2)$$

式中: R_s 为 s 偏振光的反射率; R_p 为 p 偏振光的反射率。

由(1)、(2)式可知, 随着光学常数 k/n 增大, 金属膜 p 偏振光的最小反射率增大, 偏振度减小。

铝、银、金等是制备金属反射膜的常用材料, 其中, 银膜所引入的偏振效应最小, 而且在可见光与近红外波段内具有稳定的、较高的反射率^[7]。若要在控制薄膜偏振效应的同时, 在 500 ~ 1600 nm 波段范围内获得较高的反射率, 较佳的方案是选择银作为反射镜的镀膜材料。

本文将金属银膜层的物理厚度设计为 90 nm, 该厚度能够有效保证其在目标波段范围内的反射率。在 45°倾斜入射条件下, 单层银反射膜的反射率光谱与相位差的设计结果如图 1 所示。

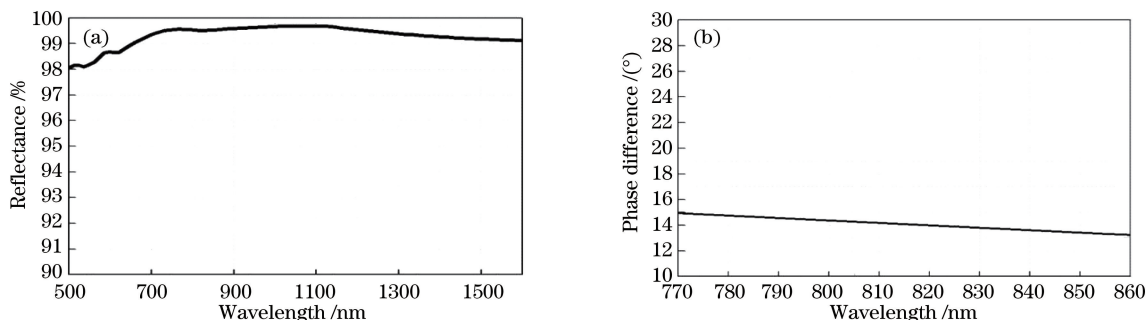


图 1 单层银膜的设计结果。(a)反射率曲线;(b)相位差曲线

Fig. 1 Design result of Ag. (a) Reflectance curve; (b) phase difference curve

银膜与 JGS-1 石英基底之间的附着力较小, 而且银膜与基底易氧化。为了改善这一缺陷, 本文在 JGS-1 基底与银膜间沉积了一层不影响光学性能、物理厚度为 10 nm 的镍铬(CrNi)作为衬底层, 并在

银膜表面沉积一层物理厚度为 30 nm 的 Al_2O_3 保护膜, 这样做可以使银膜与调控介质膜结合得更好。在 45°倾斜入射条件下, 沉积 Al_2O_3 后膜系的反射率光谱与相位差的设计结果如图 2 所示。

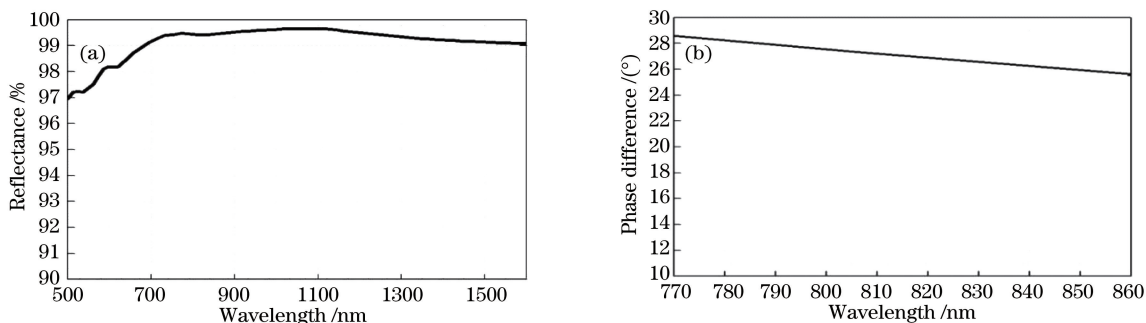


图 2 沉积 Al_2O_3 后膜系的设计结果。(a)反射率曲线;(b)相位差曲线

Fig. 2 Design result of Ag+ Al_2O_3 . (a) Reflectance curve; (b) phase difference curve

对比图 1、2 的设计结果可知,在增加一层 Al_2O_3 膜后,膜系的平均反射率仍能满足优于 95% 的要求,但 Al_2O_3 膜对相位差的影响较大。

根据光的电磁场理论,推导出 s、p 偏振光所引起的相位差 δ 与椭圆偏振光消光比(E_R)的关系式为^[8]

$$\delta = \pm 2\arctan \sqrt{\frac{1}{E_R}}, E_R \geq 1. \quad (3)$$

由(3)式可知,随着偏振分量相位差增大,保证量子通信系统低误码率的消光比降低。

2.2 偏振与相位调控膜设计

利用等效层原理可以将多层结构对称的介质膜等效为折射率更高的单层介质膜,通过改变膜层层数和每层膜厚,可以得到不同的等效折射率和等效相位^[3]。当银膜与保护膜的厚度一定时,在 Al_2O_3 表面继续沉积高折射率的介质层进行调控,就能减小反射膜所产生的相位差,从而有效地提高消光比。

根据反射镜的工作波段,并结合镀膜材料的折射率、吸收系数及理化特性,选用 Ta_2O_5 和 SiO_2 分

别作为高、低折射率材料进行反射镜偏振与相位调控膜的设计,用 H、L 分别表示光学厚度为四分之一中心波长的高低折射率材料。由于金属膜本身具有吸收大、牢固性差的缺点,故选取经典膜系 $L(\text{HL})^X$ (X 为反射堆周期数)进行设计,这样的膜系结构不仅能增加银膜的强度,还能有效减小银膜的吸收,提高反射效率。

为了不降低反射镜的反射效率,保证薄膜的可靠性以及较小的应力影响,在设计时尽可能使用最少的膜层层数来实现最佳的调控目的。选取 X 值为 2,反射镜的初始膜系结构为: $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3/d_1\text{L}d_2\text{H}d_3\text{L}d_4\text{H}d_5\text{L}$ (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 代表各膜层的厚度系数)。在设计软件中设定所需满足的各项目标值,不断优化调整每层膜厚 d 得到的设计结果为: 0.429L 2.688H 1.246L 1.13H 1.304L,设计中心波长为 710 nm。初始膜系反射率和相位差的设计曲线如图 3 所示(R 表示光谱反射率),目标波长下的偏振度及消光比设计结果见表 1。

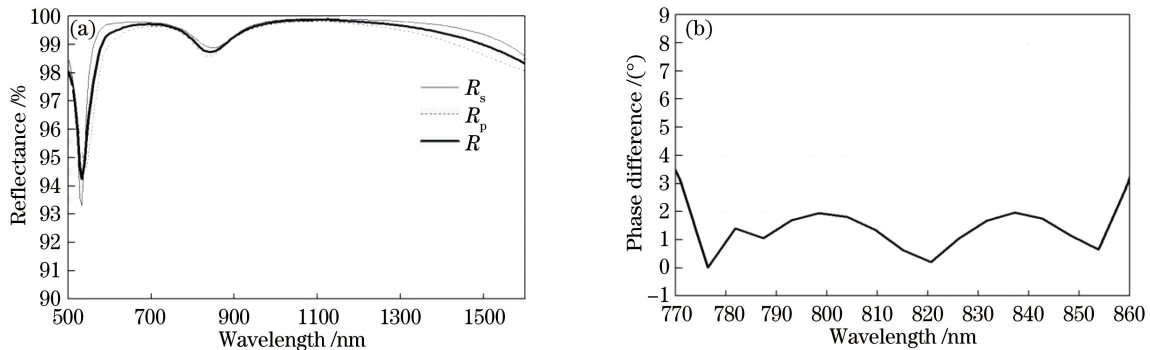


图 3 初始膜系的设计结果。(a)反射率曲线;(b)相位差曲线

Fig. 3 Design results of initial film system. (a) Reflectance curve; (b) phase difference curve

表 1 目标波长下初始膜系偏振度及消光比的设计结果

Table 1 Design result of polarization and extinction ratio of initial film system at target wavelengths

λ /nm	P	E_R
780	2.848×10^{-3}	6571:1
810	2.053×10^{-3}	7300:1
850	1.314×10^{-3}	9814:1

3 反射镜膜系的制备与测试

3.1 制备工艺

反射镜膜系的制备是在 Leybold Lab900Plus 型真空镀膜设备上完成的;银膜和衬底层 CrNi 采用电阻加热蒸发的方式进行沉积, Al_2O_3 以及高折射率材料 Ta_2O_5 、低折射率材料 SiO_2 采用电子束蒸发方式进行沉积;采用 INFICON IC/5 石英晶体振

荡器控制蒸发速率及膜层厚度。

在各工艺环节开始前,先对基底进行超声波清洗,然后用乙醇乙醚溶剂擦拭脱水,之后将基底放入真空室内。采用“冷镀”(不对基片进行恒温烘烤加热)的方式制备金属薄膜,真空室抽高真空至 1.0×10^{-3} Pa。以 15 mL/min 的体积流量向真空室内充入氩气,将工件架转速调至 30 rad/min,打开离子源进行镀膜前的离子束清洗(15 min),目的是提高膜层与基底间的附着力。关闭离子源及氩气,使轰击后的基底自然降温,降至合适的沉积真空度与温度后分别沉积 CrNi、银膜和 Al_2O_3 膜,蒸发速率分别为 0.6, 1.2, 0.8 nm/s。以 30 mL/min 的体积流量向真空室内充入氧气,打开离子源,辅助沉积 Ta_2O_5 和 SiO_2 ,蒸发速率分别为 0.15, 0.8 nm/s。完成设计膜系的沉积后,关闭离子源与气体。

3.2 性能及可靠性测试

反射镜膜系的光谱测量是在美国 Perkin Elmer 公司生产的 Lamd900 型分光光度计上完成的。在 45°入射角下,反射镜膜系的实测光谱曲线如图 4 所示。

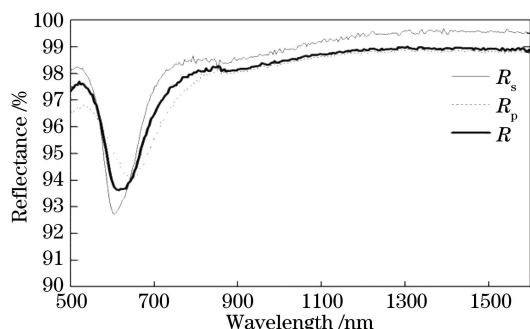


图 4 反射镜膜系的实测反射率曲线

Fig. 4 Measured reflectance curves of the mirror film system

采用旋转检偏器法对反射镜膜系的消光比进行测试。该方法是一种直接测量消光比的方法,图 5 为测量系统示意图。

测量时分别使用 780,810,850 nm 激光器作为稳定的输出光源。激光经过起偏器后,以 45°角倾斜射至待测反射镜表面,经反射镜反射后通过旋转

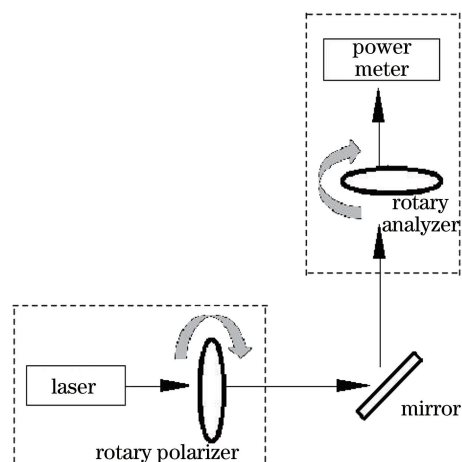


图 5 消光比测量系统示意图

Fig. 5 Sketch of ER measurement system

检偏器。当输入光的主偏振分量方向与检偏器的主轴方向重合时,后方的激光功率计探测到的功率最大;当两者方向垂直时,探测到的功率最小。待测反射镜膜系的消光比可以通过(4)式计算得出。实测偏振度和消光比数据见表 2。

$$E_R = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (4)$$

式中: I_{\max} 、 I_{\min} 分别为最大功率和最小功率。

表 2 目标波长下偏振度、消光比和相位差的测试结果

Table 2 Measured polarization, extinction ratio and phase difference at target wavelengths

λ /nm	P	I_{\max} /mW	I_{\min} /mW	E_R	δ /($^\circ$)
780	4.896×10^{-3}	2.1	0.36×10^{-3}	5833:1	1.50
810	3.768×10^{-3}	1.21	0.19×10^{-3}	6368:1	1.44
850	1.904×10^{-3}	0.8	0.095×10^{-3}	8421:1	1.25

实验结果表明,在 500~1600 nm 波段范围内的平均反射率大于 95%,反射镜膜系在目标波长下的消光比和相位差满足设计要求。

为了验证本文设计的反射镜膜系在空间环境下应用的可靠性,对其进行四项可靠性测试,测试结果见表 3。测试内容及条件如下:

1) 浸泡测试,即在 45 °C 水中浸泡 8 h,观察膜层是否脱落;

2) 附着力测试,即采用标准聚酯胶带快速撕拉,观察膜层是否拉脱;

表 3 可靠性测试结果

Table 3 Durability test results

Test	Result
Soaking	Pass
Adhesion	Pass
Temperature and humidity	Pass
High and low temperature	Pass

3) 温湿度测试,即在温度为 45 °C、相对湿度为 95%的环境中保持 24 h,观察膜层是否脱落;

4) 温度交变测试,即先将环境温度升至 (50 ± 1) °C,保持 1 h,然后降温至 (-25 ± 1) °C,保持 1 h,如此循环三次后,观察薄膜是否脱落。

3.3 测试结果分析

反射镜膜系的实测光谱能量相比设计结果有所降低,光谱也有一些偏差。这主要由于非规整膜系中部分膜层的厚度较小,使得膜厚的监控极易产生误差,多层监控误差经过累积,就会改变原有的设计结果。此外,银材料对蒸发速率及真空度十分敏感,当蒸发条件稍有改变时,银的折射率及沉积密度就会发生较大变化,从而使得反射镜的光谱与设计结果产生了偏差。与光谱能量相比,上述因素产生的误差对反射镜偏振度及相位差的影响更大,这也是偏振与相位调控反射镜研制难度较大的主要原因。因此,在制备过程中确保工艺条件的重复性尤为重

要,设计时也应将监控误差对光谱性能、偏振度和相位差的影响考虑在内。

4 结 论

反射镜选用金属反射膜加介质调控膜的膜系结构,采用热蒸发与离子辅助电子束蒸发的工艺进行制备,制备的反射镜可以满足反射能量、偏振和相位在目标波长上可调的设计要求,从而达到降低量子通信系统误码率的目的。经过一系列的环境模拟测试,验证了反射镜在空间环境下应用的可靠性。该反射镜在制备过程中所涉及的特殊工艺环节及流程对多目标波长的偏振与相位调控反射镜的研制也具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Duan W B, Li D Q, Liu B J, et al. Effect of spatial atomic oxygen on polarization contrast of polarization-maintaining mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1131001.
段微波, 李大琪, 刘保剑, 等. 空间原子氧对保偏反射镜偏振对比度的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1131001.
- [2] Li D Q, Yu T Y, Chen G, et al. Design and fabrication: phase modulated antireflection coatings in 0.55–0.85 μm waveband[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0731001.
李大琪, 于天燕, 陈刚, 等. 0.55~0.85 μm 波段增透膜的相位调控设计与研制[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0731001.
- [3] Ma X F, Wang D, Liu D Q, et al. Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 563-566.
马小凤, 王丹, 刘定权, 等. 利用等效层的消偏振宽带减反膜设计[J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 563-566.
- [4] Gu P F, Li H F, Zhang Y G, 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.
顾培夫, 李海峰, 章岳光, 等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进[J]. *光学学报*, 2003, 23(3): 377-380.
- [5] Fan Z X, Shao J D, Yi K. Optical thin films and applications [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014: 69-70.
范正修, 邵建达, 易葵. *光学薄膜及其应用*[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014: 69-70.
- [6] Li D Q, Liu D Q, Zhang F S. Control of polarization for the visible infrared broadband dichroic beamsplitter at oblique incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 5-8.
李大琪, 刘定权, 张凤山. 可见/红外宽光谱分色片偏振调控的设计[J]. *光子学报*, 2011, 40(1): 5-8.
- [7] Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 103-105.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭. *现代光学薄膜技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 103-105.
- [8] Max B, Emil W. Principles of optics[M]. Yang J S, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 15-28.
马克思, 埃米尔. *光学原理*[M]. 杨葭荪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2009: 15-28.