

空间原子氧对保偏反射镜偏振对比度的影响

段微波*, 李大琪, 刘保剑, 余德明, 陈刚, 刘定权

中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 选择金属膜层材料 Ag 和 Ta₂O₅、SiO₂、Al₂O₃ 等多种介质薄膜材料, 在石英基底上设计和制备了保偏反射镜, 其在 810 nm 和 850 nm 波长处的偏振对比度优于 10000:1。结合保偏反射镜所处的轨道环境, 进行了原子氧模拟实验, 研究了保偏反射镜样品偏振对比度的变化规律。结果表明, 随着原子氧剂量的增加, 保偏反射镜的偏振对比度呈衰减趋势, 且 +45°、-45° 方向的衰减较水平(H)、垂直(V)方向的更明显。

关键词 薄膜; 保偏反射镜; 低地球轨道; 原子氧; 偏振对比度

中图分类号 TN65

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1131001

Effect of Spatial Atomic Oxygen on Polarization Contrast of Polarization-Maintaining Mirror

Duan Weibo*, Li Daqi, Liu Baojian, Yu Deming, Chen Gang, Liu Dingquan

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

Abstract The metal coating material of Ag and dielectric thin film materials such as Ta₂O₅, SiO₂ and Al₂O₃ are selected for designing and fabricating a kind of polarization-maintaining mirror on the quartz substrate, whose polarization contrasts at wavelengths of 810 nm and 850 nm are superior to 10000:1. With the combination of the orbital environment for the polarization-maintaining mirror, the experiment for simulating the spatial atomic oxygen is conducted and the change law of polarization contrast of the polarization-maintaining mirror sample is investigated. The results show that, with the increase of the dose of the atomic oxygen, the polarization contrast of the polarization-maintaining mirror shows an overall decreasing trend. Moreover, the decreasing trends along the directions of +45° and -45° are more obvious than those along the horizontal (H) and vertical (V) directions.

Key words thin films; polarization-maintaining mirror; low earth orbit (LEO); atomic oxygen; polarization contrast

OCIS codes 310.1210; 310.5448; 310.6845

1 引 言

量子通信是利用量子手段传递和处理信息的一门学科。利用量子通信技术可以建立无法破译的密钥系统, 实现真正意义上的保密通信。现有的量子密钥分发的传输信道主要有光纤和自由空间两种。光纤传输能够减小背景光噪声、天气等外部条件对光子传输的影响。但是, 传输过程中无法避免光纤的损耗和双折射效应, 这使得光纤量子密钥分发系统的偏振保持成为一个严峻的问题。目前, 低损耗光纤的性能已经逼近理论极限, 现有光纤量子密钥分发的最远距离约为 200 km, 更长距离的光纤密钥分发非常困难。而自由空间信道中大气粒子的吸收

和散射效应很小, 且不存在双折射效应, 几乎不对完全偏振光的偏振态产生影响, 极为适合用作偏振编码的量子密钥分发信道。尤其在星地自由空间信道中, 仅有一小段为大气信道, 有效厚度仅约 20 km, 且越远离地面, 大气越为稀薄, 影响越小, 其余皆为真空信道。此外, 星地信道还能够避免地面信道的地球曲率限制。因此, 利用空间平台作为中转的偏振编码自由空间量子密钥分发是实现全球量子保密通信网络的有效手段之一。

在自由空间量子密钥分发实验中, 保偏反射镜是实验光学系统中不可缺少的光学元件。其通过光谱、偏振灵敏度、相位的三维一体调控, 可解决由偏振灵敏度及相位差引起的量子编码光子的畸变, 并

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-05-28; 录用日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605229)、中国科学院青年创新促进会人才计划(2013160)

* E-mail: duanweibo@mail.sitp.ac.cn

将量子通信误码率控制在较低的水平。

目前,国内外未见偏振调控类反射元件空间环境适应性研究的相关报道。原子氧是低地球轨道中残留大气的重要成分,与保偏反射膜层高速碰撞会发生化学反应和剥蚀效应。前期的实验结果表明,偏振态与相位调控反射镜对环境影响较为敏感。随着量子科学的发展,对偏振调控反射元件空间环境适应性的研究显得尤为迫切。本文设计和制备了一种空间量子通信系统用保偏反射镜,结合保偏反射镜所处的轨道环境,进行了原子氧模拟实验,研究结果对推动保偏反射镜在星地间量子通信系统中的长寿命工程化应用具有一定价值。

2 保偏反射镜膜系设计与制备

2.1 保偏反射镜的设计

量子密钥分发的第一个标准协议是由 Bennett 和 Brassard 在 1984 年提出的,即 BB84 协议,它的安全性是基于量子力学的一个性质:通过测量无法彻底地分辨非正交状态。根据 BB84 协议,可以采用任意的两维量子系统。实验采用的是线偏振态的两基四态方法,利用偏振方向间隔 45° 的四路线偏振光来进行量子编码^[1],如图 1 所示,其中 H 表示水平方向, V 表示垂直方向。

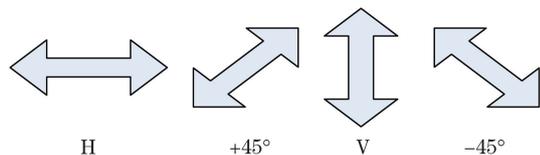


图 1 用于偏振编码的四路线偏振光

Fig. 1 Four paths of linear polarized lights for polarization encoding

在量子密钥分发系统光路中,以 532 nm 和 670 nm 激光作为同步光和信标光,而 810 nm 和 850 nm 激光作为量子编码光。为了实现光学能量的高效传递和量子编码光偏振态的高效保持,保偏反射镜需要同时实现三个功能:1)在 532,670,810,850 nm 等工作波长有稳定的光学效率;2)控制量子编码波长对反射镜的偏振灵敏度;3)调控偏振编码波长对反射镜 s 光和 p 光的相位差。

根据保偏反射镜的技术要求,采用“金属+多层介质膜”的组合结构,分别实现宽光谱能量的高效传递以及量子编码波长偏振态的调控,反射镜的结构设计如图 2 所示。

在可见近红外波段,可选择的金属膜层材料有 Ag、Al、Au 等。Ag 在已知金属材料中的偏振效应

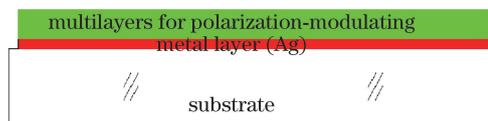


图 2 保偏反射镜结构示意图

最小^[2-3],是较好的选择。对于介质膜层材料的选择,充分考虑薄膜材料光学特性、力学匹配等因素,选择 Ta_2O_5 、 SiO_2 和 Al_2O_3 三种介质材料,用于反射镜偏振态的调控^[4-5]。设计中心波长 λ_0 为 700 nm,优化后的膜系为 1M 0.342N 1.337L 1.43H 1.42L,其中 M、N、L 和 H 分别代表 Ag、 Al_2O_3 、 SiO_2 和 Ta_2O_5 。

保偏反射镜在 45° 入射角下的反射光谱,s 和 p 偏振光的反射光谱及保偏反射镜在量子编码波长处的反射相位如图 3~5 所示。

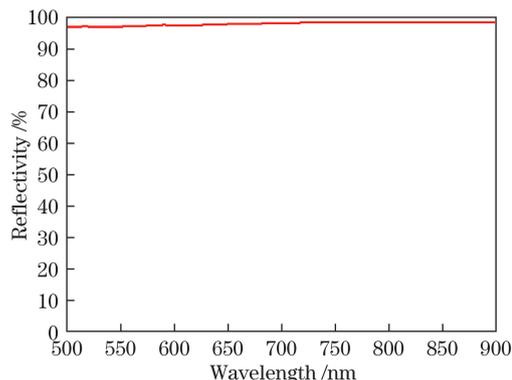


图 3 保偏反射镜的反射光谱

Fig. 3 Reflectance spectrum of polarization-maintaining mirror

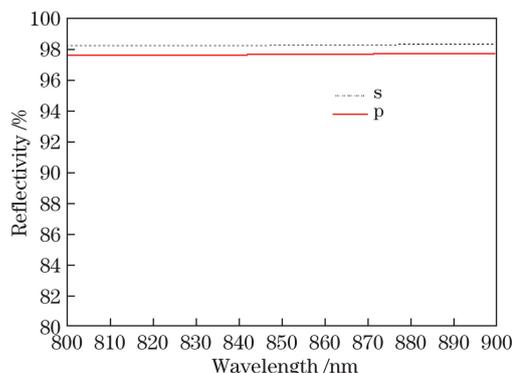


图 4 s 和 p 偏振光的反射光谱

Fig. 4 Reflectance spectra of s-polarized and p-polarized lights

2.2 反射镜的制备与性能测试

保偏反射镜膜层的制备在德国 Leybold 公司生产的 LAB900 型真空镀膜机上进行。该设备的极限真空可达 5×10^{-5} Pa。蒸发源为两把 e 型电子枪和两组电阻蒸发源。两把电子枪的高压均为 10 kV,可根据需要自由选择环形或多穴坩埚;阻蒸电极的

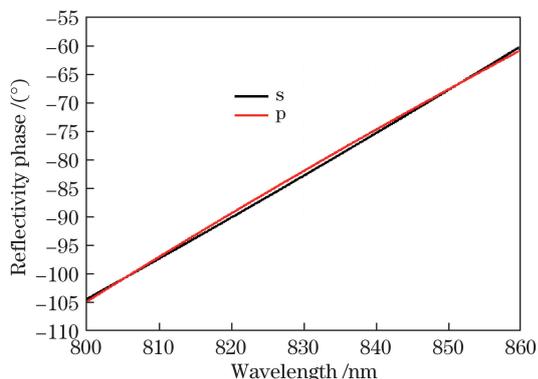


图 5 保偏反射镜的反射相位

Fig. 5 Reflection phase of polarization-maintaining mirror

电压为 6 V, 电流在 0~600 A 间可调节。工装夹具为磁流体密封高速旋转夹具, 转速连续可调, 最高可达 800 r/min。膜厚监控采用 4 探头石英晶振和德国 Leybold 公司生产的 OMS 5100 光学自动控制系统。辅助源为射频 (RF) 离子源, 栅网口径为 12 cm, 最大束流可达 500 mA。

当真空室压强达到 8×10^{-4} Pa 时, 打开工件转动, 转速设定为 50 r/min; 打开离子源清洁基片 5 min。金属 Ag 采用电阻蒸发, 蒸发速率约为 6.0 nm/s。为减少材料的吸收, 不采用离子辅助沉积; 为增大 Ag 与石英基底的结合力, 沉积金属 Ag 之前, 使用厚度约为 5 nm 的 Cr 和 Cu 打底。金属氧化物的沉积采用电子束蒸发加离子辅助的方式, 离子源通入 25 mL/min O_2 和 5 mL/min Ar, 真空室压强约为 1.6×10^{-2} Pa, 离子源的束流设置为 350 mA, Al_2O_3 、 Ta_2O_5 和 SiO_2 三种材料的沉积速率分别为 0.2, 0.15, 0.8 nm/s。

3 保偏反射镜的性能测试与表征

3.1 保偏反射镜的反射光谱和偏振灵敏度测试

保偏反射镜的光谱测试在美国 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda900 型分光光度计上进行。该设备配备有 V-W 型绝对反射附件, 可以测量样品的绝对反射率; 加上起偏和检偏附件, 可实现 s、p 偏振光的反射率的绝对测量。在 45° 入射角下, 保偏反射镜的实测反射光谱及 s、p 偏振分量的反射能量分别如图 6、7 所示。

3.2 保偏反射镜的偏振对比度测试

保偏反射镜的偏振对比度测试在自研的偏振对比度测试系统上进行, 系统结构示意图如图 8 所示。测试系统使用半导体激光器作为测试光源, 功率在 0.5~50 mW 内可调; 光线从激光器出射后经准直

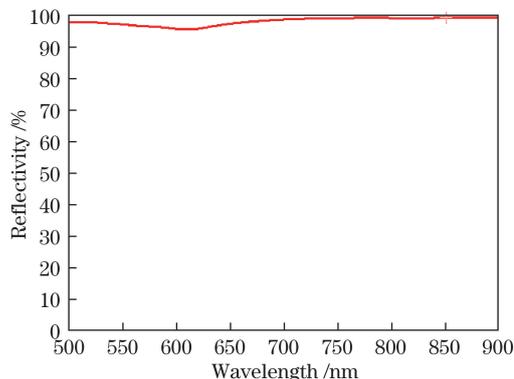


图 6 保偏反射镜的实测光谱曲线

Fig. 6 Measured spectral curve of polarization-maintaining mirror

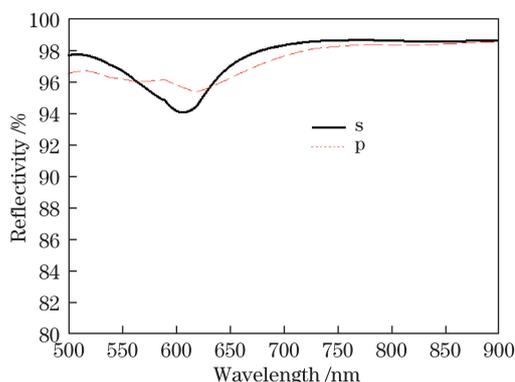


图 7 偏振灵敏度测试曲线

Fig. 7 Test curve of polarization sensitivity

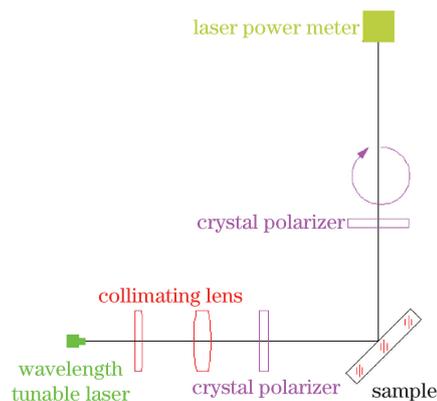


图 8 偏振对比度测试系统示意图

Fig. 8 Schematic of polarization contrast measurement system
透镜组进行准直扩束, 形成口径约为 30 mm 的准平行光; 测试系统有两块偏振对比度大于 100000:1 的偏振片, 分别作为起偏器和检偏器, 其中起偏器决定进入测试样品的线偏振光的偏振方向, 检偏器旋转 360° 获取的光信号极大值和极小值的比值为被测样品在该起偏方向的偏振对比度; 测试系统的能量接收单元为激光功率计, 根据被测激光器的波长选择对应的探头。

表 1 和表 2 分别给出了偏振调控反射镜在 810 nm 和 850 nm 两个量子编码波长处的偏振对比度(C_{ER})实测结果,其中 s、p 光的反射相位差 $\Delta = 2 \times \arctan \sqrt{\frac{1}{C_{ER}}} \times 180$ 。可以看出,4 个偏振编码方向的偏振对比度均在 10000:1 以上,水平(H)和垂直(V)偏振方向的对比度较 +45° 和 -45° 方向的略高。

表 1 保偏反射镜在 810 nm 处的偏振对比度测试结果

Table 1 Test result of polarization contrast of polarization-maintaining mirror at 810 nm

Polarization direction	Maximum power /mW	Minimum power / μ W	C_{ER}	$\Delta /(^{\circ})$
H	10.29	0.47	21890	0.77
V	18.35	0.95	19320	0.82
+45°	12.85	0.80	16060	0.90
-45°	15.00	0.82	18291	0.85

表 2 保偏反射镜在 850 nm 处的偏振对比度测试结果

Table 2 Test result of polarization contrast of polarization-maintaining mirror at 850 nm

Polarization direction	Maximum power /mW	Minimum power / μ W	C_{ER}	$\Delta /(^{\circ})$
H	22.41	0.83	27000	0.70
V	17.35	0.79	21962	0.77
+45°	9.33	0.68	13720	0.98
-45°	10.64	0.99	10747	1.11

表 3 模拟 AO 实验前后反射镜的偏振对比度测试结果

Table 3 Test result of polarization contrast of polarization-maintaining mirror before and after experiment for simulating AO

Experiment condition	Polarization direction							
	H		V		+45°		-45°	
	C_{ER}	$\Delta /(^{\circ})$	C_{ER}	$\Delta /(^{\circ})$	C_{ER}	$\Delta /(^{\circ})$	C_{ER}	$\Delta /(^{\circ})$
Before experiment	21890	0.77	19320	0.82	16060	0.90	18291	0.85
After 6 months	20566	0.80	18550	0.84	13200	1.00	15667	0.92
After 12 months	17700	0.86	15300	0.93	11356	1.08	12770	1.01
After 24 months	16650	0.89	13333	0.99	7543	1.32	7925	1.29
After 60 months	12983	1.01	11102	1.09	5560	1.54	4910	1.64

测试结果表明,模拟 AO 实验后,4 个偏振编码方向的偏振对比度均出现衰减,随着 AO 剂量的增加,衰减加剧;60 个月时,H 和 V 偏振方向的衰减率分别达到了 31.2% 和 32.9%,而 +45° 和 -45° 偏振方向的衰减率分别达到了 71.1% 和 92.9%;相比于 H、V 方向,+45°、-45° 方向的偏振对比度对 AO 环境更敏感。

4 模拟原子氧实验与数据分析

4.1 原子氧效应与研究现状

在低地球轨道(LEO,200~700 km)环境中,主要组分为原子氧(AO)和氮气(N₂)。AO 具有高化学活性,其氧化能力远高于分子氧^[6],对航天器表面的高温氧化、高速撞击会严重侵蚀大部分有机材料,造成结构材料强度下降、功能材料性能变差,并会造成航天器敏感表面的污染^[7],给航天器长寿命、高可靠带来严重威胁。

从 20 世纪 80 年代起,AO 环境对航天器材料性能的影响引起了国内外广泛的关注^[8],但 AO 环境对空间量子通信系统中保偏反射镜偏振对比度的影响研究鲜有报道。鉴于偏振对比度和量子通信系统误码率的直接相关性,研究模拟 AO 环境对保偏反射镜偏振对比度的影响及作用规律具有重要的意义。

4.2 模拟实验条件

保偏反射镜的模拟 AO 实验方法参照文献^[9]。

实验条件:模拟实验轨道高度为 500 km;反射镜与迎风面夹角为 45°;AO 密度为 $1.02 \times 10^{20} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$,AO 能量为 5 eV;模拟 AO 实验前本底真空度为 1.0×10^{-3} Pa,模拟 AO 实验时真空度为 1.0×10^{-1} Pa。

4.3 实验结果与数据分析

因实验数据较多,在此仅列出 810 nm 波长下,不同剂量 AO 实验前、后(6、12、24、60 个月)后反射镜的偏振对比度数据,见表 3。

对于充分氧化的金属氧化物,AO 的强氧化作用并不明显;采用强离子辅助沉积的金属氧化物薄膜具有较高的聚集密度,可实现对底层 Ag 薄膜的较好保护。引起反射镜偏振对比度衰减的主要因素是 AO 高速撞击膜层表面引起的切削和剥蚀效应。因此,为了提高保偏反射镜的偏振对比度稳定性,应尽可能增大反射镜面法线与飞行器迎风面的夹角,

或者选择反射镜镜面朝向背风面等手段,以减小AO与镜面的碰撞几率。

5 结 论

选择多种金属和介质薄膜材料,设计和制备了空间量子通信系统用保偏反射镜。使用自研的偏振对比度测试系统,对该反射镜进行了测试,其4个偏振编码方向上的偏振对比度均达到了10000:1以上。根据高度为500 km的LEO轨道环境,结合反射镜与卫星飞行迎风面的夹角等实际工况,开展了模拟空间AO环境实验。结果表明,随着AO剂量的增加,保偏反射镜的偏振对比度呈衰减趋势,且 $+45^\circ$ 、 -45° 方向的衰减较H、V方向的更明显。研究结果对偏振调控类反射光学元件长寿命工程化的应用具有一定价值。

参 考 文 献

- [1] Yin X, Liu D Q, Duan W B, *et al.* Design and fabrication of near-infrared dichroic beam-splitter for polarization state coding[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(6): 505-509.
尹欣, 刘定权, 段微波, 等. 近红外波段偏振编码用分色片的设计与制作[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(6): 505-509.
- [2] Macleod H A. *Thin-film optical filters*[M]. Tucson: CRC Press, 1999.
- [3] Zhong D S. *Vacuum deposition*[M]. Shenyang: Liaoning University Press, 2001.
- 钟迪生. *真空镀膜*[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001.
- [4] Duan W B, Liu D Q, Zhang F S. Study on optical properties of two thin film materials in medium-wave infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 177-180.
段微波, 刘定权, 张凤山. 两种中波红外薄膜材料的光学特性研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(s1): 177-180.
- [5] 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.
- [6] Zhu W M. Atomic oxygen environment and its testing research[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2002, 19(4): 6-12.
朱文明. 原子氧环境及其实验研究[J]. *航天器环境工程*, 2002, 19(4): 6-12.
- [7] Lu E, Yan C X, Wu Q W, *et al.* Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(5): 364-376.
卢镔, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学遥感器环境适应性设计与实验研究[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(5): 364-376.
- [8] Samwel S W. Low earth orbital atomic oxygen erosion effect on spacecraft materials[J]. *Space Research Journal*, 2014, 7(1): 1-13.
- [9] Shuvalov V A, Kochubei G S, Priimak A I, *et al.* Changes of properties of the materials of spacecraft solar arrays under the action of atomic oxygen[J]. *Cosmic Research*, 2007, 45(4): 294-304.