

doi:10.3788/gzxb20134201.0084

偏振光学系统中相位延迟机理及其应用

吴金才,何志平,舒嵘,贾建军,陈爽,王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘 要:为了实现偏振编码的自由空间量子密钥分发实验,研制了偏振保持的光机系统,并对该系统所采用的相位延迟传输机理及应用进行了研究,建立了偏振误码率在允许范围内的量子链路.首先,采用矩阵光学理论对偏振光的方位角、相位延迟与消光比的关系进行了介绍.接着,通过矩阵光学理论及实验验证了偏振光学系统的相位延迟线性叠加原理.然后,在相位延迟线性叠加原理的基础上,设计了一套偏振保持光学系统,并通过理论分析及实验验证了此系统具备良好的偏振保持效果.最后,将偏振保持光学系统的设计机理应用于量子通信光机系统的设计之中,并取得了良好的设计效果.实验结果表明:相位之间的相互抵消可以有效地进行偏振保持设计,最终设计的量子通信光机系统的偏振消光比优于 500:1. 满足了自由空间量子通信实验中对偏振误码率的要求.

关键词:光通信;量子密钥分发;偏振消光比;琼斯矩阵;相位延迟

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2013)01-0084-6

Mechanism and Application of Phase Shift in the Polarized Optical Systems

WU Jin-cai, HE Zhi-ping, SHU Rong, JIA Jian-jun, CHEN Shuang, WANG Jian-yu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to realize free space quantum key distribution, an optical system with the property of retaining the polarization state is customized to reduce the quantum bit error rate, and the mechanism and application of phase shift in polarized optical system is investigated. Firstly, based on the principle of matrix optics, the relationship among azimuth angle, phase shift and extinction ratio of polarized light is presented. Then the principle of phase shift added linearly is validated in the theorem and experiments. Based on the principle of phase shift added linearly, a set of polarization keeping system is designed and validated in the theorem and experiments, and the principle is applied to design optical systems for quantum communication successfully. Experimental results indicate that the extinction ratio of polarized light of optical systems for quantum communication exceed 500:1. It can satisfy the system requirements of quantum bit error rate for quantum communication.

Key words: Optical communication; Quantum key distribution; Extinction ratio; Jones matrix; Phase shift

0 引言

量子通信从量子力学不确定性原理和量子态不可克隆定理出发,提供了一种原理上绝对安全的全新通信方式,也是量子信息领域最接近实用化的方

向之一.近年来,远距离量子通信成为国际激烈竞争的焦点,目前量子密钥分发的距离在光纤中均超过 100 km,但这个传输距离已到达瓶颈,如何突破距离的限制在更广域的范围实现量子通信过程成为摆在人们面前的难题.基于卫星平台的自由空间量

基金项目:上海市科委重大基础研究项目(No. 08dz1400701)和中国科学院重大创新项目(No. G0821500202)资助

第一作者:吴金才(1983—),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为量子通信系统中偏振保持技术. Email:jcwu@mail.ustc.edu.cn

责任作者/通讯作者:王建宇(1959—),男,研究员,博士,主要研究方向为光电遥感技术、量子通信等. Email:jywang@mail.sitp.ac.cn

收稿日期:2012-05-17; **录用日期:**2012-08-12

子通信方案是目前国际上公认的广域量子通信网的最切实可行的实现途径.自由空间量子通信技术的研究一旦取得突破将在整个量子领域产生极其深远的影响,有望大幅度提高信息传输的安全性、信息传输通道容量和效率等,是未来信息技术发展的重要战略性方向,同时将对国民经济和社会的进步产生难以估量的影响^[1].

在自由空间量子通信中技术最成熟、最易实现的当属基于诱骗态的量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)技术^[2-5],其最终目的是实现基于星地平台的全球量子保密通信.目前,自由空间 QKD 的密钥编码方式一般采用 BB84 方案,其密钥是利用单光子的偏振态来进行二进制编码,其中定义水平(H)或+45°(+)线偏振对应于经典比特 0; 竖直(V)或-45°(-)线偏振对应于经典比特 1. 鉴于 QKD 中量子信息的载体为单光子的偏振态,通信终端的光学系统对偏振态的影响将导致量子通信误码率增加,因此,光机系统的偏振保持效果是 QKD 能否成功实现的关键因素之一.为了对光机系统进行有效的偏振保持设计,并评估各分立光学元件对量子光偏振影响的叠加效果,需要对偏振光经过光学元件时的传输机理进行研究.本文利用矩阵光学理论对偏振光的方位角、相位延迟与消光比之间的转换关系进行了推导,同时对偏振光学系统的相位延迟传输机理进行了研究^[6],并通过实验验证了相位延迟线性叠加原理;最后采用相位延迟线性叠加原理设计了偏振保持光路,同时将该光路应用于量子通信光机系统的偏振保持设计当中.实验结果表明:各分立光学元件相位延迟之间的相互抵消效果有效地保持了线偏光经过光机系统后的偏振状态,满足了自由空间量子通信实验中对偏振误码率的要求.

1 理论基础

对偏振光传输过程进行分析时,可以采用琼斯矢量、琼斯矩阵来分别表示偏振光的状态及光学元件的传输矩阵,而琼斯矢量采用偏振光的振幅和相位作为表征参量,但振幅与相位都不能通过测量直接获得,通常先测量偏振方位角及消光比,再通过转换关系得出振幅和相位,从而正确表征偏振光的琼斯矩阵^[7-8].

1.1 琼斯矢量和琼斯矩阵

偏振光通常用两正交偏振分量的琼斯矢量进行表示,其表达式为

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x e^{i(\alpha + \varphi_x)} \\ a_y e^{i(\alpha + \varphi_y)} \end{pmatrix} = e^{i(\alpha + \varphi_x)} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 E_x 、 E_y 分别表示 X、Y 分量的复振幅,而 a_x 、 a_y 为 X、Y 分量的实振幅, φ_x 、 φ_y 为 X、Y 分量的相位,两分量之间的相位差为 $\delta = \varphi_y - \varphi_x$.

式(1)中各分量的振幅进行归一化后为

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{a_x}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}} \\ \frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}} e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

偏振光在经过光学元件前后的偏振态会发生变化,其变化表现在两个方面:

1) X、Y 分量振幅量发生变化,其原因是 X、Y 分量的反射率不一致,表现为方位角度的变化;2) X、Y 分量的相位延迟不一致,表现为消光比的变化.当偏振光 $\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$ 通过任意的光学元件或系统之

后,其偏振光状态变成 $\begin{pmatrix} E_x' \\ E_y' \end{pmatrix}$ 的话,实现该变换的光学元件或系统都可以用 2×2 的矩阵表示,此矩阵称作光学元件或系统的琼斯矩阵.当光学元件或系统导致 X、Y 分量之间产生相位延迟 δ ,且两偏振分量反射率有一定差异,则琼斯矩阵可以表示为

$$R = \begin{pmatrix} r_x & 0 \\ 0 & r_y e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 δ 为经过系统后的相对相位延迟, r_x^2 为 X 分量的反射率, r_y^2 为 Y 分量的反射率.

1.2 偏振光的方位角、相位延迟与消光比的关系

对于电矢量^[9] $\mathbf{E} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y e^{i\delta} \end{pmatrix}$ 的偏振光,已知 X、Y

偏振分量的实振幅为 a_x 、 a_y ,相位延迟角为 δ ,即可求解出参考曲线.而在实验测量中只能获得偏振光的方位角 θ 、消光比 ER 与各分量的反射率 r_i^2 ,并不能直接获取琼斯矢量的参量,需要对其相互关系进行转化.如图1,偏振椭圆长轴与 X 轴呈 θ 角(即方位角),椭圆长短轴分别为 $b_{x'}$ 、 $b_{y'}$,同时定义 α 为振幅比角、 β 为椭圆率角,两者分别满足

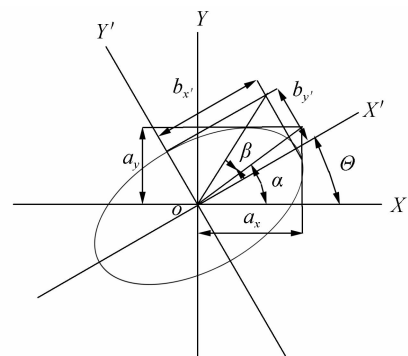


图1 偏振椭圆的坐标转换关系

Fig. 1 The conversion of coordinates about ellipse

$$\begin{cases} \tan \alpha = a_y/a_x, -90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ \tan \beta = b_y/b_x, -45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \end{cases} \quad (4)$$

根据文献[8]可以得到相位延迟角 δ 、方位角 θ 、振幅比角 α 及椭圆率角 β 满足关系为

$$\begin{cases} \tan 2\theta = \tan 2\alpha \cos \delta \\ \sin 2\beta = \sin 2\alpha \sin \delta \end{cases} \quad (5)$$

在实际测量中只能获知方位角 θ 及长短轴方向的能量,其比值称之为偏振消光比 ER,偏振消光比满足关系

$$ER = \left(\frac{b_x}{b_y}\right)^2 = \frac{1}{\tan^2 \beta} \quad (6)$$

根据式(5)消掉 α ,可以得到相位延迟角 δ 满足

$$\left(1 + \frac{\tan^2 2\theta}{\cos^2 \delta}\right) \left(1 - \frac{\sin^2 2\beta}{\sin^2 \delta}\right) = 1 \quad (7)$$

继续计算可以得到

$$\sin^2 \delta = \frac{\sin^2 2\beta(1 + \tan^2 2\theta)}{\sin^2 2\beta + \tan^2 2\theta} \quad (8)$$

在量子通信中,主要关注的是 H、V、+、-4 种线偏光的偏振态变化情况,对于 H、V 线偏振光来说, θ 为 0 或 $\pi/2$,由式(13)可知 $\sin 2\beta = 0$,此时相对相位延迟量不影响其消光比,同时由式(8)可知 $\delta = \pm \pi/2$,与实际情况相符合;对于 +、-线偏振光来说, θ 为 $\pi/4$ 或 $3\pi/4$,此时由式(7)可知

$$1 - \frac{\sin^2 2\beta}{\sin^2 \delta} = 0,$$

即 $\beta = \pm \delta/2$,则相对相位延迟与消光比之间满足 $\delta = \arctan \sqrt{1/ER}$.

2 相位叠加原理的研究及实验验证

2.1 相位叠加原理的理论研究

在偏振编码的 QKD 时,一般采用 H、V、+、-线偏光进行信息编码,这 4 种线偏光经过系统后的消光比变化会直接影响误码率,是实验中至关重要的环节.通过理论分析可知^[10],相对相位延迟的大小对 H、V 的消光比没有影响,但是会导致 +、-的消光比急剧变化,+、-线偏光消光比随相位延迟角度的变化曲线如图 2,其中横坐标表示相位延迟角度,纵坐标表示 $\lg(ER)$,其中 ER 为偏振消光比.可以发现:①当相位延迟为 0° 或 180° 时,输出光的偏振消光比达到最大;②当相位延迟为 90° 时,输出光为圆偏振光,其消光比达到最小 $ER = 1$,则 $\lg(ER) = 0$.

在 QKD 中要求系统在接收 H、V、+、-4 路偏振光时都具备较高的保持度,在实际的整机设计过程中,如果仅依靠设计单片的偏振保持光学元件来

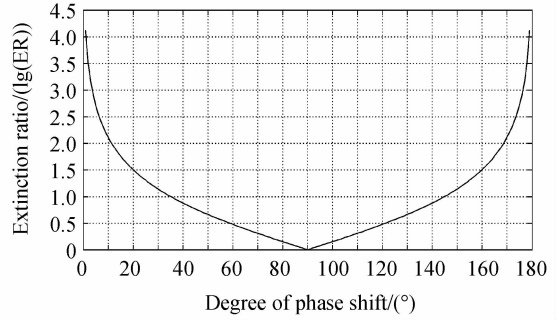


图 2 +、-消光比随相位延迟角的变化

Fig. 2 The curve of extinction ratio about +、-linear polarized light for different phase shifts

达到整机的偏振要求,这样对单片元件的要求极高,其设计难度大;但如果在系统层面上考虑偏振保持,则可以降低单片光学元件的设计难度.由琼斯表征的特性可知,当偏振光经过一系列光学元件后,整个系统的传输矩阵为各分立元件传输矩阵的乘积,假设两组光学元件的传输矩阵分别为

$$\begin{bmatrix} r_{x_1} & 0 \\ 0 & r_{y_1} e^{i\delta_1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} r_{x_2} & 0 \\ 0 & r_{y_2} e^{i\delta_2} \end{bmatrix}$$

则系统的传输矩阵 R 满足

$$R = \begin{bmatrix} r_{x_1} & 0 \\ 0 & r_{y_1} e^{i\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{x_2} & 0 \\ 0 & r_{y_2} e^{i\delta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1} r_{x_2} & 0 \\ 0 & r_{y_1} r_{y_2} e^{i(\delta_1 + \delta_2)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2 相位叠加原理的实验验证

由式(9)可知每组光学元件所产生的相位延迟将会线性叠加,若系统的最终相位延迟控制在要求的区间内,即可满足系统的设计要求,这样相位线性叠加原理在整机的偏振保持设计中具有广泛的应用前景.下面以两片 Ag 膜反射镜为例对相位延迟线性叠加原理进行实验验证:实验中,采用波长为 803 nm 的激光光源,单片起偏片与检偏片在 803 nm 处的偏振消光比均高于 30 000 : 1,可以认为起偏后为理想的线偏光,在入射角为 45° 的情况下,分别测量了单片反射镜及两片反射镜在反射光共面情况下的偏振变化情况,测试光路如图 3,测试数据如表 1.

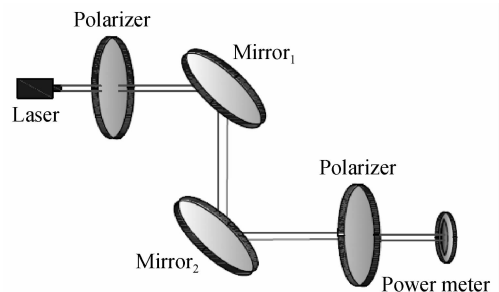


图 3 相位延迟线性叠加原理验证光路

Fig. 3 The optical system which validating the principle of phase shift added linearly

表 1 相位延迟线性叠加原理验证光路消光比测试数据

Table 1 The datasheet of extinction ratio of optical system which validating the principle of phase shift added linearly

Polarized angle (incident ray)	Mirror ₁			Mirror ₂			2 mirrors(phase added)		
	Extinction ratio	Phase shifts	Polarized angle	Extinction ratio	Phase shifts	Polarized angle	Extinction ratio	Phase shifts	Polarized angle
H	18 000 : 1	—	0°	85 000 : 1	—	0°	30 000 : 1	—	0°
V	9 500 : 1	—	90°	13 000 : 1	—	90°	11 000 : 1	—	90°
+	37.95 : 1	18.4°	45°	44.46 : 1	17.1°	45°	9.75 : 1	35.5°	45°
—	36.69 : 1	18.8°	135°	40.16 : 1	17.9°	135°	9.26 : 1	36.4°	135°

由理论分析及实验结果显示:1)由理论分析及表1中H、V消光比的测量数据可知,系统的相对相位延迟不会导致H、V线偏光的消光比变差;2)验证实验中的Ag反射镜为一特定相位延迟系统,+、-线偏光经过Ag反射镜后消光比会急剧变差,由表1可知,测试结果与理论相符合,同时计算可知Ag反射镜产生了17°~18°左右的相位延迟;3)相位线性叠加原理验证光路中两片反射镜入射面处于共面,此时出射光的检偏角度会保持不变,与测试结果相一致;4)通过表1中计算数据可知,两片反射镜反射后所产生的相位延迟与每片反射镜所产生相位延迟之和相一致,在误差允许的范围内,可以认为测试结果符合相位线性叠加原理。

3 相位叠加原理在保偏设计中的应用

3.1 偏振保持光路设计及验证

以上实验验证了相位延迟线性叠加原理,下面将通过理论分析及实验测试来阐述其在偏振保持设计中的具体应用:同样以两片相同批次的Ag反射镜为例,假设其X分量的反射率为 r_x^2 ,Y分量的反射率均为 r_y^2 ,其相位延迟分别为 δ_1 、 δ_2 ,则其传输矩阵分别为

$$\begin{pmatrix} r_x, 0 \\ 0, r_y e^{i\delta_1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} r_x, 0 \\ 0, r_y e^{i\delta_2} \end{pmatrix},$$

当偏振光经过如图4所示的光路时,反射镜2的方位轴相对于反射镜1旋转 θ 时,反射镜2的传输矩

阵为

$$\begin{pmatrix} \cos \theta, -\sin \theta \\ \sin \theta, \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x, 0 \\ 0, r_y e^{i\delta_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta, \sin \theta \\ -\sin \theta, \cos \theta \end{pmatrix}$$

当旋转90°时,系统的传输矩阵R可以表示为

$$R = \begin{pmatrix} 0, -1 \\ 1, 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x, 0 \\ 0, r_y e^{i\delta_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0, 1 \\ -1, 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x, 0 \\ 0, r_y e^{i\delta_2} \end{pmatrix} = r_x r_y e^{i\delta_1} \begin{pmatrix} e^{i(\delta_2 - \delta_1)}, 0 \\ 0, 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可知,在此种情况下,相同光学元件所产生的相对相位延迟在传输过程中相抵消,达到了同时保持H、V、+、-线偏光消光比不变的效果,此方法可以广泛应用与偏振保持系统的设计过程中。下面就两片Ag膜反射镜保偏光路设计进行实验验证^[11],实验实物图如图4:实验中,激光光源与偏振片与2中相同,在入射角为45°的情况下,分别测量了单片反射镜及保偏光路的偏振态变化情况,具体测试数据如表2。

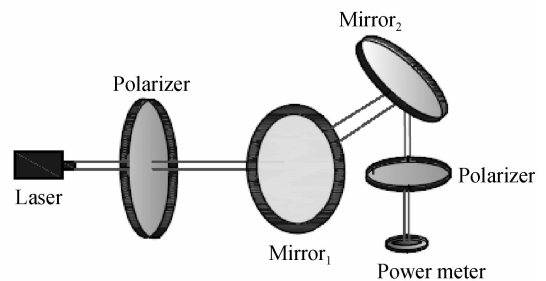


图4 偏振保持设计光路

Fig. 4 Optical system which retaining the polarization states

表 2 偏振保持光路消光比测试数据

Table 2 The datasheet of extinction ratio about optical systems which retaining the polarization

Polarized angle (incident ray)	Mirror ₁			Mirror ₂			2 mirrors(phase added)		
	Extinction ratio	Phase shifts	Polarized angle	Extinction ratio	Phase shifts	Polarized angle	Extinction ratio	Phase shifts	Polarized angle
H	53 000 : 1	—	0°	46 000 : 1	—	0°	32 000 : 1	—	90°
V	31 000 : 1	—	90°	28 000 : 1	—	90°	18 000 : 1	—	0°
+	33.2 : 1	19.7°	45°	31.7 : 1	20.1°	45°	20 700 : 1	0.8°	135°
—	37.2 : 1	18.6°	135°	35 : 1	19.2°	135°	23 500 : 1	0.8°	45°

从理论分析与实验数据可以得出:1)偏振保持光路中两片反射镜的相对方位旋转了90°,导致出射光的偏振方向相对于入射光旋转了相应角度,其测试结果与理论相一致;2)由于两反射镜的相对方

位旋转了90°,导致反射镜1的H正好为反射镜2的V,经过两次反射之后两片反射镜的相位延迟相互抵消,达到保持+、-线偏光偏振消光比的效果,同时又对H、V消光比影响不大,从而可以同时保

证 H、V、+、- 线偏光线偏度, 表 2 中的数据与理论相符合, 在误差允许的范围内, 两面 Ag 反射镜所产生的相位延迟相互抵消, 达到偏振保持的目的。

3.2 偏振保持光路在量子通信光机系统中的应用

目前, 已经将以上偏振保持光路的设计理念应用于量子通信光机系统的设计之中, 图 5 为量子通信的接收端光机系统, 其跟踪系统为摆镜方案, 整个光机系统的前光路部分如图 6, 量子光经过摆镜、主望远镜及另外 3 片反射镜后进入后光学系统, 进入后光路中需要将跟踪光与量子光通道的相互分离, 对分离所采用的分色片需要进行偏振保持设计, 对分色片的膜系设计提出一定的要求^[12-13], 由于前光学系统中摆镜的口径比较大, 一般镀金属膜, 而金属本身的特性是必然会引入一定的相位延迟, 从而导致 +、- 线偏光会往椭圆偏振光变化, 为了解决大摆镜引入偏振变化, 可以通过后面的反射镜与大摆镜之间相互配合来实现光学元件之间相位延迟的抵消, 从而减小整机所引入的相位延迟。



图 5 量子通信接收光机系统

Fig. 5 The receiving optical system of quantum communication

偏振保持光路在量子通信的接收光机系统中的具体使用情况描述如下: 如图 6 所示, 平行的理想线偏光经过摆镜 1 反射, 再经过主望远镜(主镜 2、次镜 3)后变成口径较小的平行光, 该平行光再经过反射镜 4、5、6 后进入后光学系统, 由图可知, 摆镜 1 与反射镜 4 的入射面相互垂直, 此时线偏光在摆镜 1 与反射镜 4 上反射时 H、V 正好发生了互换, 两次反射所产生的相位延迟相互抵消, 而反射镜 5、6 的光路与偏振保持光路完全一致, 同样可以实现比较好的偏振保持效果, 而偏振光在主镜 2、次镜 3 上的入射角度较小, 使得其偏振保持效果也较好. 系统偏振光学设计时采用了反射镜相互配合来实现光学元件之间相位延迟的抵消, 从而减小整机所引入的相位延迟, 最终使得线偏光经过光学系统后仍然保持

良好的线偏度, 整机的偏振消光比测试数据如表 3 所示: 由最终测试结果可知, 光机系统的中光学元件的相位延迟产生相消的效果, 使得 +、- 线偏光在通过光机系统后仍然保持消光比较高的偏振状态, 从而保证通信过程中的误码率较低。

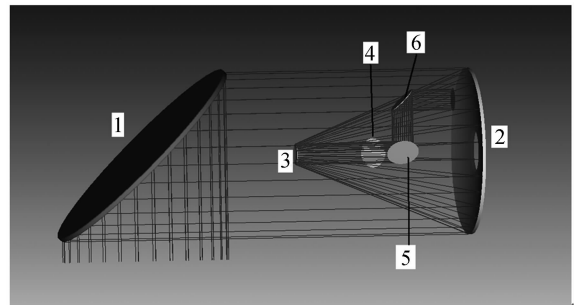


图 6 偏振保持光路在接收系统中的应用

Fig. 6 The application of optical system which retaining the polarization states in receiving system

表 3 接收光机系统消光比测试数据

Table 3 The datasheet of extinction ratio of receiving optical system

Polarized angle (incident ray)	Extinction ratio
H	9 600 : 1
V	7 100 : 1
+	1 120 : 1
-	980 : 1

4 结论

在自由空间 QKD 中, 为控制误码率在允许的范围, 必须对光机系统进行偏振保持设计, 且要求偏振保持度较高. 基于以上偏振保持设计需求, 本文利用矩阵光学原理对 H、V、+、- 线偏振光通过光学元件时的传输机理进行了研究, 结果表明: 1) 当线偏光在通过一组基矢不发生相对旋转的光学元件时, 其产生的相对相位延迟会不断的线性叠加, 从而影响 +、- 线偏光的线偏度, 但对 H、V 的线偏度影响不大; 2) 基于相位叠加原理, 本文设计了一个通过旋转光学元件相对角度的方法来实现偏振保持的系统, 当两光学元件相对方位角旋转 90° 时, 导致两光学元件的 H、V 互换, 使得两光学元件产生的相位延迟相互抵消, 从而达到同时保证 H、V、+、- 线偏光消光比的效果, 通过理论分析及实验验证都验证了此光路具备良好的偏振保持效果; 3) 结论 1)、2) 在量子通信跟踪光机系统的偏振保持设计中已经发挥了巨大作用, 目前在实验室状态下, 接收端整机的偏振消光比已经达到了 $1\ 000 : 1$ 左右, 实际应用中消光比也已经达到了 $500 : 1$ 左右。

参考文献

[1] BAI Yu-hong, YANG Xiu-bin, YAN Han. China in quantum

- optics and quantum information[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(5): 684-698.
- 白雨虹,杨秀彬,严寒. 量子光学与量子信息领域中的中国[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(5): 684-698.
- [2] LIU Dan, PEI Chang-xing, QUAN Xiao-dong, *et al.* New decoy state quantum key distribution for increasing the security communication distance[J]. *Journal of Xidian University*, 2010, **37**(1): 13-17.
- 刘丹,裴昌幸,权东晓,等. 一种可提高安全通信距离的诱骗态量子密钥分发方案[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2010, **37**(1): 13-17.
- [3] WANG X B. Beating the photon number splitting attack in practical quantum cryptography[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(23): 230503-1~230503-4.
- [4] WANG X B. Quantum key distribution with 4 intensities of coherent light[J]. *Physical Review A*, 2005, **72**(1): 012322-1~012322-6.
- [5] CHEN Xia, WANG Fang-qiang, LU Yi-qun, *et al.* A differential phase shift key distribution QKD system combining wite efficient BB84 scheme[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 1052-1056.
- 陈霞,王发强,路铁群,等. 结合高效 BB84 协议的差分子量子密钥分发系统[J]. *光子学报*, 2008, **37**(5): 1052-1056.
- [6] WANG Jin-dong, QING Xiao-juan, *et al.* An effective active phase compensation method for quantum key distribution system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(01): 281-286.
- 王金东,秦晓娟,魏正军,等. 一种高效量子密钥分发系统主动相位补偿方法[J]. *物理学报*, 2010, **59**(01): 281-286.
- [7] 玻恩,沃尔夫. *光学原理*[M]. 杨葭孙译. 5 版. 北京: 科学出版社, 1978, 43-47.
- [8] WANG Jun-li, FANG Qiang, WANG Yong-qiang, *et al.* Novel polarization transformer using rotatable waveplates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 21-26.
- 王军利,方强,王永昌,等. 利用旋转波片组实现偏振变换器的两种新方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 21-26.
- [9] 新谷隆一,范爱英,康昌鹤. *偏振光*[M]. 北京: 原子能出版社, 1994, 18-32.
- [10] AZZAM R M, BASHARA M. *Ellipsometry and polarized light*[M]. New York: North-Holland Publishing Co, 1977, 48-51.
- [11] PALIK E D. *Handbook of optical constants of solids*[M]. New York: Academic Press, 1985, 350-357.
- [12] LI Gang, SUN Lian-chun, YU Zhao-bo, *et al.* Polarization effects in optical thin films [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, **11**(6): 647-651.
- 李刚,孙连春,于兆波,等. 光学薄膜中的偏振效应[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(6): 647-651.
- [13] LI Da-qi, LIU Ding-quan, ZHANG Feng-shan. 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,等. 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.

• 下期预告 •

抛光表面的亚表层损伤检测方法研究

田爱玲,王会婷,党娟娟,王春慧

(西安工业大学 光电工程学院 陕西省薄膜与光学检测重点实验室,西安 710032)

摘要: 光学元件磨削加工引入的亚表面损伤威胁着光学元件的使用性能及寿命,成为现阶段高能激光发展的瓶颈问题,特别是抛光表面光学元件的亚表面损伤检测已成为光学元件制造行业的研究热点和难点. 本文结合光学共聚焦成像、层析技术、显微光学、光学散射、以及微弱信号处理等技术,给出了基于光学共聚焦层析显微成像的光学元件亚表面损伤检测方法. 分析了不同针孔大小对测量准确度的影响,并首次给出了亚表面损伤的纵向截面分布图. 与腐蚀法比较结果显示:针对自行加工的同一片 K9 玻璃,采用本文提出的方法测得的亚表面损伤深度 $45\ \mu\text{m}$ 左右;采用化学腐蚀处理技术,对光学元件逐层刻蚀,观察得到的亚表面损伤深度 $50\sim 55\ \mu\text{m}$. 两者基本一致,进一步验证了本文采用的方法可以实现对光学元件亚表面损伤的定量、非破坏检测.

关键词: 抛光表面;亚表面损伤;共聚焦成像;显微光学;光学散射