

星地激光通信系统偏振特性分析

王超^{1,2} 江伦^{1,2} 董科研^{1,2} 安岩^{1,2} 姜会林^{1,2}

¹长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空地激光通信技术重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 对于星地激光通信,使用圆偏振光进行传输是其较优的选择,此时必须对其光学系统进行偏振定标。利用菲涅耳公式及琼斯矩阵对影响光学系统偏振态的因素进行了分析。针对一个特定的星地激光通信发射光学系统,给出了系统结构以及存在于系统中的几种不同分光膜系的曲线。利用光学软件 ZEMAX,对初始状态为线偏振的激光在光学系统中传播过程的每一步进行偏振特性分析。分析结果表明:对于空间光通信光学系统,45°放置的分光片和反射镜是导致偏振态改变的主要因素;一般意义上的消偏振膜系只能保证 p 分量和 s 分量的能量透射率相同,但 p 光和 s 光之间仍存在相位延迟,造成偏振态变化;调整入射光的光矢量方向至与入射面平行或垂直,可将光学系统引起的仪器偏振误差降至最低。

关键词 光通信;星地激光通信;光学系统;偏振特性;波长分光片

中图分类号 TH74 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120607

Analysis of the Polarization Characteristic of a Satellite-to-Ground Laser Communication Optical System

Wang Chao^{1,2} Jiang Lun^{1,2} Dong Keyan^{1,2} An Yan^{1,2} Jiang Huilin^{1,2}

¹*NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

²*Fundamental Science on Space-Ground Laser Communication Technology Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract To the satellite-to-ground (STG) optical communication, the circular polarization laser is an optimum choice for the information transmission. Firstly, the influence factors of the polarization characteristics of the optical system are analyzed by the Fresnel formula and the Jones Matrix. Then the structure of a practical STG laser communication transmitting optical system and the designed transmittance curves of several different bandpass filtering films in the system are given. Propagation of the linear polarization laser in the optical system is simulated by the optical software ZEMAX. The results indicate that the beam splitters and mirrors on a 45° tilt make the greatest contributions to the polarization state transform. Ordinary depolarization film can only prove that the power p-component and s-component transmittances are identical. But the phase delay of p-light and s-light still exist, which can make the polarization state change. By adjusting the direction of the incident light vector to the incident plane, the instrument polarization error induced by the optical system can be reduced to the minimum.

Key words optical communications; satellite-to-ground laser communication; optical system; polarization characteristic; wavelength beam splitter

OCIS codes 260.5430; 220.4830; 230.1360

1 引言

相对于传统的微波通信而言,空间激光通信具有通信容量大、保密性好、抗电磁干扰能力强、不需要无线电频率使用许可、设备体积小、重量轻和功耗低等优点,因此受到了国际上许多国家和地区的重视^[1-4]。由

收稿日期: 2015-05-22; 收到修改稿日期: 2015-07-01; 网络出版日期: 2015-10-25

基金项目: 国家自然科学基金重大计划培育项目(91338116)

作者简介: 王超(1986—),女,博士,讲师,主要从事空间激光通信中的光学设计和偏振定标、偏振补偿方面的研究。

E-mail: nicklo19992009@163.com

于光波的偏振态在大气信道传输过程中相对稳定,因此圆偏振光适合作为空间光通信的信息载体^[5]。此外,圆偏振态具有旋转对称的特性,可使得系统的性能不受发射和接收终端相对运动的影响,因此许多远距离激光通信系统采用圆偏振光作为传输光^[6]。2008年10月至2009年2月,日本进行了LUCE卫星终端和NICT地面站之间下行信号光束的偏振特性测量实验,其中LUCE的发射光即为左旋圆偏振光,该实验证实了圆偏振光束经过星地大气传输后偏振特性仍能较好的保持^[7]。综上所述,圆偏振载波是目前星地空间光通信的较优选择。

激光通信的发射端由半导体激光器和光学系统组成。当激光器出射的光束通过光学系统时,由于存在斜入射情况,光束偏振态往往由线偏振转化为椭圆偏振,此时必须对整个系统进行偏振定标和采取偏振补偿手段,使得最终出射光的偏振态为圆偏振。以往研究者对特定种类光学系统的偏振特性进行了大量报道^[8-12],如陈卫斌对投影显示系统进行偏振分析,张颖等对透射式旋转对称成像光学系统进行了偏振光线追迹和偏振像差分析等。然而,对于激光通信系统的偏振特性研究十分稀少。本文针对光通信发射系统进行了仪器偏振分析,所得到的结论对于该种系统的光学设计和膜系设计有一定指导作用。

本文利用琼斯矩阵对影响光学系统偏振态的因素进行了分析,介绍了一个实际激光通信卫星终端的光学发射系统结构及其中存在的几种薄膜的光学性质,最后使用ZEMAX软件对光线在系统内的传播过程进行了偏振特性分析,并总结了降低该类光学系统偏振误差的一些方法。

2 影响光学系统偏振特性的因素

所有的光学界面都会导致非正入射光波的偏振态发生变化。单个界面在给定波长 λ 处的偏振特性可利用琼斯矩阵来表示,并以p光和s光的振幅反射率 r 、振幅透射率 t 以及相位差 ϕ_r 和 ϕ_t 描述。对于光在同一面上的透射和反射,应分别采用不同的偏振特征矩阵来表示。

假设光从一介质到另一介质的折射率是突变的,而且两介质均是各向同性的。入射介质折射率为 n_1 ,出射介质折射率为 n_2 ,入射光电场矢量平行入射面的分量为p分量,垂直于入射面的分量为s分量。则根据菲涅耳公式^[13],该界面的振幅反射系数 r_s, r_p 和振幅透射系数 t_s, t_p 分别为

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \alpha'}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \alpha'}, \quad (1)$$

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \cos \alpha'}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \alpha'}, \quad (2)$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \alpha'}, \quad (3)$$

$$t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \alpha'}, \quad (4)$$

式中 α 为入射角, α' 为折射角。则光从一种介质到另外一种介质斜入射时的反射琼斯矩阵为^[15]

$$J_r = \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix}. \quad (5)$$

同理,透射的琼斯矩阵为

$$J_t = \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对于沿 z 轴传播的光波,如果 XY 平面与入射面有一定的夹角 θ ,那么琼斯矩阵变为

$$J'_r = R^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} R(\theta), \quad (7)$$

$$J'_t = R^{-1}(\theta) \begin{bmatrix} t_p & 0 \\ 0 & t_s \end{bmatrix} R(\theta). \quad (8)$$

式中 $R(\theta)$ 和 $R^{-1}(\theta)$ 为旋转矩阵,分别为

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$R^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

光学界面表面往往镀有薄膜,其同样会产生偏振效应。对于 m 层光学膜系,每层膜的琼斯矩阵为 J_i ,入射面与 XY 平面夹角 θ ,那么多层膜系的琼斯矩阵为

$$J' = J'_m \cdots J'_1. \quad (11)$$

利用(1)~(10)式即可对各类光学系统进行偏振光线追迹,从而对光学系统偏振效应进行准确建模。

2 通信发射分系统光学结构

待分析的系统为某卫星激光通信终端中的通信发射子光路。该通信终端是收发一体结构,具有通信发射、信标发射、通信接收、信标接收等支路,共用前方卡式系统及主镜后方的三镜。其中通信发射子光路的结构如图1所示,其工作波长为 1550 nm,用户要求必须保证该路发射光为圆偏振光。光路中具有多块分光片(bandpass filter),这是为了将通信发射光和其他子光路的光束(波长不同)隔离开。由于其他子光路无偏振性能要求,故在讨论中省略。

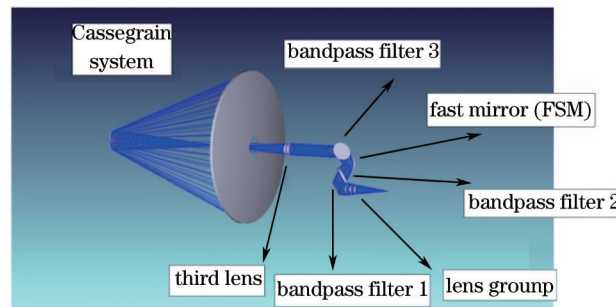


图1 通信发射系统结构

Fig.1 Structure of the communication transmission subsystem

图中分光片1、2、3分别镀有不同的膜系,其膜系的透射曲线和相应说明如下:

1) 分光片1

45°放置;对 1550 nm 反射,对 1530 nm 透射,消偏振。透射率曲线如图2所示。

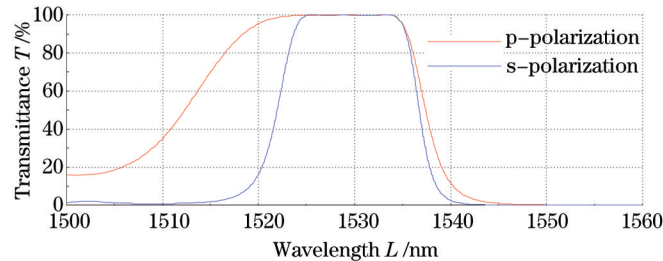


图2 分光片1透射率曲线

Fig.2 Transmission curves of bandpass filter 1

2) 分光片2

45°放置;对 830 nm 反射,对 1530, 1550 nm 透射,消偏振。透射率曲线如图3所示。

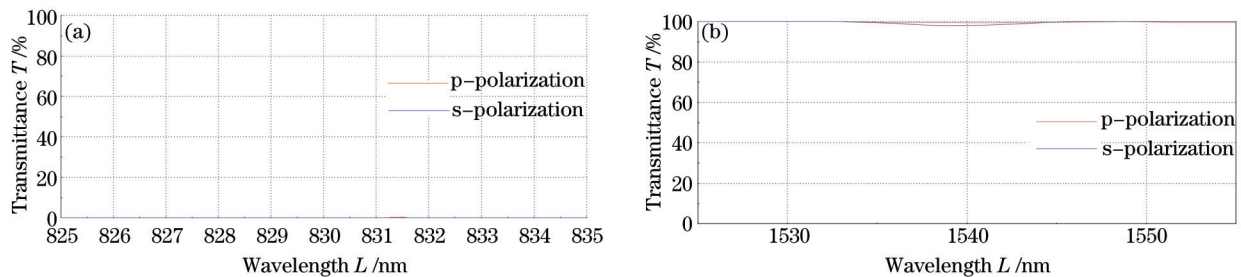


图3 分光片2透射率曲线。(a) 825~835 nm; (b) 1525~1555 nm

Fig.3 Transmission curves of bandpass filter 2. (a) 825~835 nm; (b) 1525~1555 nm

3) 分光片 3

45°放置;对 808 nm 透射,对 830,1530,1550 nm 反射,消偏振。透射率曲线如图 4 所示。

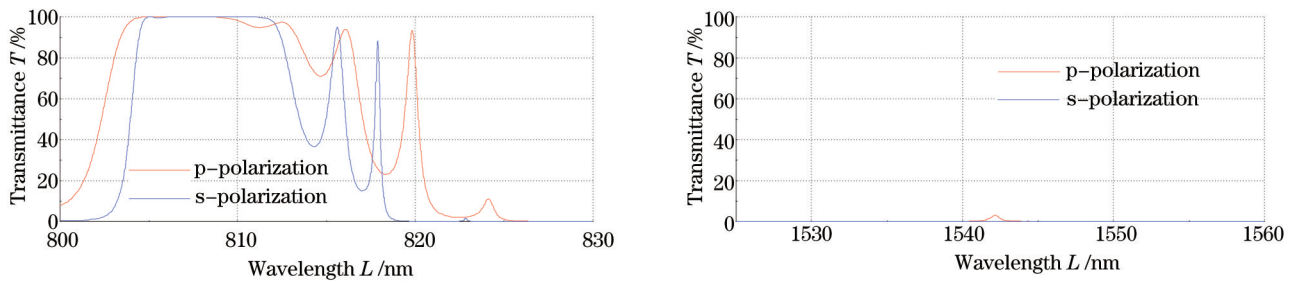


图 4 分光片 3 透射率曲线。(a) 800~830 nm; (b) 1525~1555 nm

Fig.4 Transmission curves of bandpass filter 3. (a) 800~830 nm; (b) 1525~1555 nm

3 利用 ZEMAX 进行光路偏振态分析

使用光学设计软件 ZEMAX 对光线在以上通信发射光学系统中的整个传播过程进行偏振特性仿真分析。分析前,将系统中每一表面都在 ZEMAX 中添加与真实系统相同的膜系,其中透镜表面附有增透膜,反射镜附有高反金属膜,3 种分光片各自附加相应的自定义膜系。

为了考察 p 光和 s 光偏振分离效果最严重的一类情况,将初始激光器发出的线偏振光矢量方向与入射面的夹角设定为 45°,见图 5 中红圈内部分。此时 X 方向(设为 p 光)和 Y 方向(设为 s 光)的归一化振幅均为 0.707, p 光和 s 光间的相位延迟为 0。图 5 中间区域的偏振态阵列代表着激光在通过最接近激光器的透镜组,到达第一块分光片前表面时,系统光瞳内的偏振态分布。可见,通过透镜组后, p 光振幅约 0.7, s 光振幅约 0.7,光能有轻微衰减,此时相位延迟仍然近似为 0°。

如图 6 所示,激光继续被分光片 1(反射 1550 nm,透射 1530 nm)反射后, p 光振幅约 0.7, s 光振幅约 0.7,相位延迟约 26°,变成椭圆偏振光。

如图 7 所示,进一步经分光片 2(反射 830 nm 透射 1530, 1530 nm)透射后, p 光振幅约 0.7, s 光振幅约 0.7。 p 光和 s 光间的相位差约 16.8°。

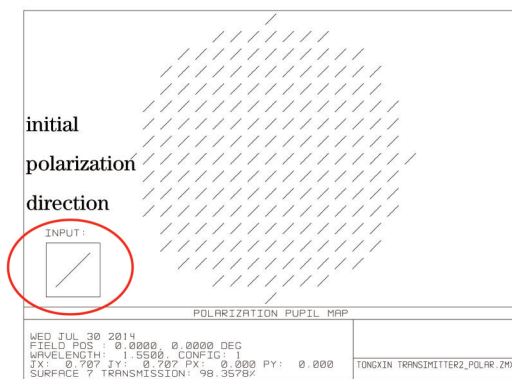


图 5 通过透镜组后的偏振态分布

Fig.5 Polarization pupil map after passing through the lens group

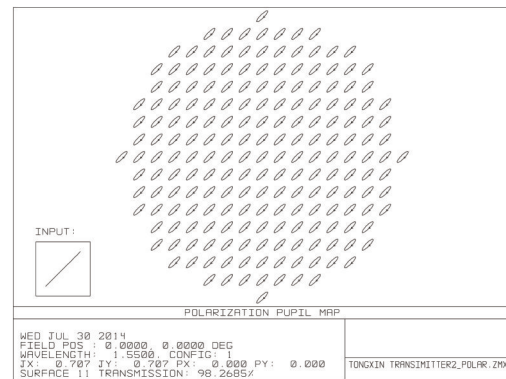


图 6 经分光片 1 反射后偏振态分布

Fig.6 Polarization pupil map after reflected by bandpass filter 1

如图 8 所示,通过镀高反膜的快速反射镜(FSM)后, p 光振幅约 0.66, s 光振幅约 0.68, p 光和 s 光间的相位延迟减小至 3.7°。

如图 9 所示,通过分光片 3(透射 808 nm,反射 830,1530,1550 nm)后, p 光振幅约 0.66, s 光振幅约 0.68,相位延迟约 29.4°。

如图 10 所示,通过望远单元的三镜和卡式系统并最终出射后, p 光振幅约 0.59, s 光振幅约 0.61,相位延迟约 29°。

根据上述分析可得到如下结论:

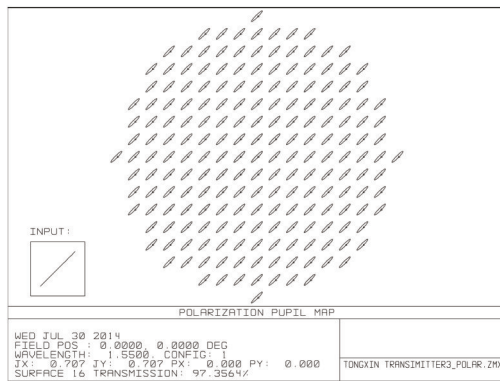


图7 经分光片2透射后偏振态分布

Fig.7 Polarization pupil map after passing through bandpass filter 2

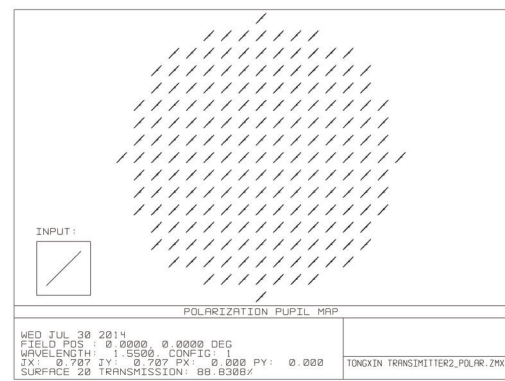


图8 通过镀高反膜的快速反射镜后偏振态分布

Fig.8 Polarization pupil map after reflected by the FSM with high-reflecting film

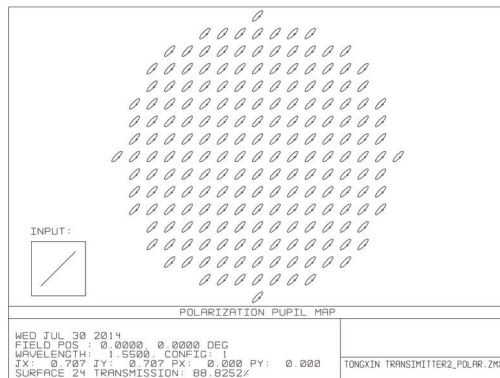


图9 通过分光片3后偏振态分布

Fig.9 Polarization pupil map after passing through bandpass filter 3

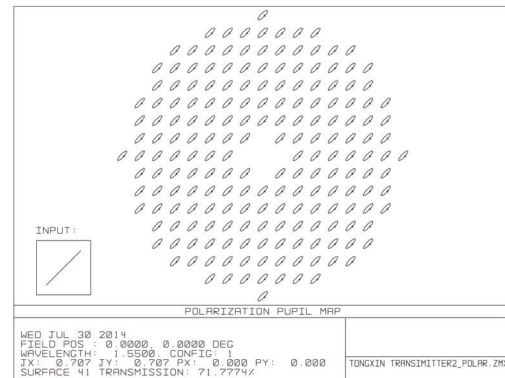


图10 通过卡式系统最终出射后偏振态分布

Fig.10 Polarization pupil map after transmitted from the Cassegrain system

1) 卡式系统和其他与光轴垂直放置的透镜等,由于光线在每一点的入射角都不大(接近 0°),对偏振态影响很小。主要影响偏振态的是 45° 分光片和反射镜。

2) 线偏振光通过 45° 放置的消偏振分光片后,其p光和s光的振幅不变(由图5、图6的变化可知),也就是这两种光在总能量中所占的比率不变。但两种光的相位差不再为0,光束偏振态由线偏振光变为椭圆偏振光。可见,常见的“消偏振”分光片仅指在特定入射角度、特定波长处,s光和p光的透射率和反射率相等,但这两种正交偏振态的光经由界面后相位延迟一致是很难保证的。因此即使分光片镀有消偏振膜,仍然会改变透过光束的偏振状态。真正的消偏振薄膜还应保证两种垂直偏振分量的相位差为0,但这种膜系造价极高。

3) 初始激光器发出的线偏振光的振动方向不同,最终系统出射光的偏振态也不同。将初始线偏光振动方向改为垂直于入射面(p光)时,系统最终出射光的偏振态见图11。可见最终偏振态与初始偏振态相比变

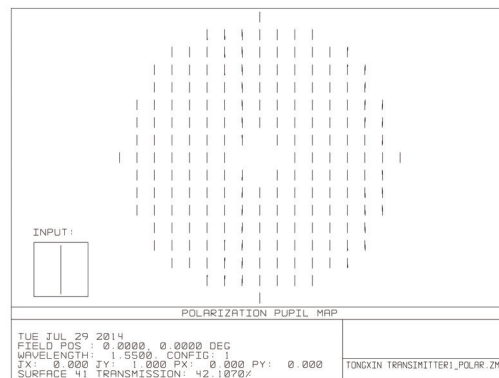


图11 初始偏振光完全为p光时最终偏振态

Fig.11 Final polarization state when the initial state is pure p-component

化很小,仍近似为线偏振光。初始入射光为s光同理。因此在实际设计系统时,在激光器后可连接保偏光纤作为出射介质,并旋转光纤到特定角度,保证从光纤出射时偏振方向与入射面平行或垂直。并在光路中适当位置(如卡式系统的三镜后)放置一个1/4波片,将波片快轴固定在与偏振方向成45°状态,即可在卡式系统出口处得到圆偏振光。

4 结 论

利用菲涅耳公式与琼斯矩阵对影响光学系统偏振态的因素进行了分析,包括光学界面与光学薄膜上的光线非正入射情况。之后针对一个特定的卫星激光通信发射光学系统,给出了系统结构以及存在于系统中的几种不同分光膜系的透射率曲线,并利用光学软件ZEMAX对光线在系统中的传播过程进行偏振光线追迹。仿真分析得到如下结论:1)在通信发射光学系统中,45°放置的分光片和反射镜是导致偏振态改变的主要因素;2)要得到完全意义上的消偏振薄膜,该膜系必须保证在设计波长、入射角处,p光和s光的透射率相等且相位延迟为0;3)调整入射光的光矢量方向至与入射面平行或垂直,可将光学系统对偏振态的影响降到接近于0,即光学系统客观上具有保偏作用。本文结果对空间光通信系统中的光学系统设计和膜系设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Toyoshima M, Leeb W R, Kunimori H, *et al.*. Comparison of microwave and light wave communication systems in space application[J]. SPIE, 2005, 5296: 59621U.
- 2 Zhao Xin, Liu Yunqing, Tong Shoufeng. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505009.
赵 馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505009.
- 3 Yu Xiaonan, Tong Shoufeng, Zhao Xin, *et al.*. Simulation system of the beacon pointing and acquisition process in the satellite laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805007.
于笑楠, 佟首峰, 赵 馨, 等. 基于合作信标的卫星激光通信瞄准捕获仿真系统[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805007.
- 4 Zheng Yang, Fu Yuegang, Hu Yuan, *et al.*. Research on four-mirror dynamic alignment based on space laser communication link networks[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105001.
郑 阳, 付跃刚, 胡 源, 等. 基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105001.
- 5 Zhao Xinhui. Study on the Circle Polarization Shift Keying and the Theory of Polarization Propagation in Wireless Optical Communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 1-8.
赵新辉. 无线光通信中旋光调制技术及偏振传输理论的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 1-8.
- 6 Yang Peng, Ai Hua. Design of laser communication system with circular polarization modulation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0916002.
杨 鹏, 艾 华. 圆偏振调制激光通信系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0916002.
- 7 Toyoshima M, Takenaka H, Shoji Y. Polarization measurements through space-to-ground atmospheric propagation paths by using a highly polarized laser source in space[J]. Opt Express, 2009, 17(25): 22333-22340.
- 8 Chen Weibin. Polarization Analysis of Projection Display System and Research of Polarizing Element[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005: 16-19.
陈卫斌. 投影显示系统偏振分析及偏振器件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005: 16-19.
- 9 Fu Xiuhua, Mo Zhaoyan, Huang Jinlong, *et al.*. Design and fabrication of polarizing beam splitter in adaptive optics laser guide star system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 34(1): 0131002.
付秀华, 莫朝燕, 黄金龙. 自适应光学激光导星系统中偏振分光膜的研制[J]. 中国激光, 2014, 34(1): 0131002.
- 10 Wang Guocong, Wang Jianli, Zhang Zhenduo, *et al.*. Polarization analysis of the telescope system used for space target polarization detection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1211003.
王国聪, 王建立, 张振铎, 等. 用于空间目标偏振探测的望远镜系统偏振分析[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1211003.
- 11 Luo Hongmei, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, *et al.*. Polarization analysis of a real high numerical aperture optical lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122002.
罗红妹, 岑兆丰, 李晓彤, 等. 实际高数值孔径光刻系统的偏振分析[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1122002.
- 12 Zhang Ying, Zhao Huijie, Xing Hui, *et al.*. Polarization aberrations of transmitting rotationally symmetric optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(4): 757-763.
张 颖, 赵慧洁, 邢 辉, 等. 透射式旋转对称光学系统中的偏振像差[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 757-763.
- 13 Yu Daoying, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 296, 440-444.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 296, 440-444.

栏目编辑: 王晓琰