

基于旋光-双反射结构的星载量子密钥系统精跟踪镜研究

赵顾颢¹ 赵尚弘¹ 幺周石² 蒙文¹ 王翔¹ 朱子行¹ 刘丰²

(¹空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

(²中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710000)

摘要 提出了一种适用于星载量子密钥分发的偏振无关精跟踪反射结构, 反射结构利用旋光晶体和两面材质相同的反射镜实现偏振态的自动补偿。仿真结果显示, 普通的反射镜对于偏振态的影响极大, 从量子误码率上来看, 折射率为 1.52 的单面精跟踪反射镜将引入 40% 左右的误码率。而旋光-双反射结构最大仅引入了 0.25% 的量子误码率, 特别是在零偏转附近的量子误码率趋近于零。

关键词 光学设计; 偏振无关反射结构; 星载量子密钥分发; 旋光晶体; 双反射镜; 精跟踪

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1018001

Fine Tracking Mirror in Satellite-Based Quantum Key Distribution Based on Magneto-Optical Crystal and Two Mirrors

Zhao Guhao¹ Zhao Shanghong¹ Yao Zhoushi² Meng Wen¹ Wang Xiang¹
Zhu Zhihang¹ Liu Feng²

(¹The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

(²Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract An optical polarization independence reflection structure applies to fine tracking mirror in satellite-based quantum key distribution is proposed. This structure is composed of magneto-optical crystal and two same mirrors. The results of simulation show that single mirror badly influences the polarization state. For the mirror with refractive index 1.52, the quantum bit error rate caused by mirror is 40%. The quantum bit error rate caused by polarization independence reflection structure is not more than 0.25%, particularly, it is approaching zero when the deflection is approaching zero.

Key words optical design; polarization independence reflection structure; quantum key distribution; magneto-optical crystal; two reflection mirrors; fine tracking

OCIS codes 230.2240; 230.5440; 270.5568

1 引 言

量子密钥分发技术能够实现密码的远距离完全保密传输^[1~5]。星载量子密钥分发技术是建立全球量子分发系统的最佳途径^[6], 目前有很多理论和实验都证明了星载量子密钥分发的可行性^[7~10]。

其中一些关键的器件被证明在星地链路距离上是有效的^[11~14]。精跟踪镜是星上光学通信系统中重要的一个光学器件^[15], 被用于调整光束指向以便对准通信目标。精跟踪镜的特点决定了光束需要以斜角度入射且入射角在持续地改变, 这样光束的偏振态

收稿日期: 2012-06-21; 收到修改稿日期: 2012-07-04

基金项目: 五院科技发展研究课题(2011WK11)资助课题。

作者简介: 赵顾颢(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光通信技术和量子密钥等方面的研究。

E-mail: zgghlupin@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信和激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

会因反射镜的偏振效应而改变^[16]。对基于强度调制的光通信系统而言,偏振态的部分改变并不会影响系统性能。而地面量子密钥通信系统与星载量子密钥分发不同,不需要精跟踪系统,故没有遇到反射镜的问题。但是对于基于偏振编码的星载量子密钥系统而言,偏振态的改变将极大地提高量子误码率(QBER)。

目前消除反射镜偏振效应的办法主要有三种:一是利用镀膜技术^[17,18],但是该技术仅能在某一特定的人射角范围内有效,并且消偏振镀膜需要数十层的各种材料膜系,这一复杂的结构很难保证在发射及运行过程中保持长时间的稳定;二是根据双模干涉理论^[19],设计应用于波导中的偏振无关反射镜,但是该结构现未能应用于自由空间光学系统;三是利用正交放置的反射镜以消除偏振效应,该结构通常被用于航天活动的偏振遥感器之中^[20]。正交反射镜结构利用两面完全相同的反射镜正交放置,通过调整两个反射面互相垂直而利用反射镜本身的偏振效应互相进行补偿,使得入射光和出射光的偏振态保持一致。但是这一结构的缺点是反射镜的相对位置保持固定且入射光与出射光有较严格的相对关系。本文提出了一种基于旋光晶体和双反射镜实现的偏振无关的反射结构,该结构能够有效消除一般反射镜中的偏振效应。

2 理论推导与计算

图1为一般精跟踪反射镜的结构示意图。入射光 L_{in} 由从天线透镜中心 O_1 射向精跟踪反射镜中心 O_2 ,反射镜能够以 O_2 为中心做两自由度的运动,入射光通过反射镜的调整指向目标。设当入射角为 $\pi/4$,入射光与反射光相互垂直时的反射平面 O_1O_2Q 为初始反射平面。以 O_1 点为圆心,建立右手

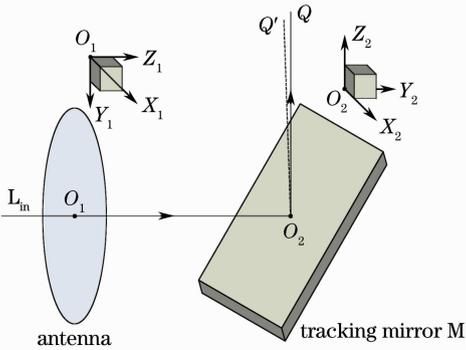


图1 单反射镜精跟踪结构示意图

Fig.1 Schematic drawing of single mirror reflection structure

直角坐标系 (X_1, Y_1, Z_1) , Z_1 轴平行于光束方向, X_1 轴垂直于初始反射平面向外。设以 O_2 点为圆心建立右手直角坐标系 (X_2, Y_2, Z_2) , Z_2 轴平行于初始反射光束方向, X_2 轴平行于 X_1 轴方向。假设 O_2Q' 为精跟踪状态下的出射方向,则 O_1O_2Q' 为精跟踪状态下的反射面。

发射端发射的单光子的偏振态可以表示为 $[E_s, E_p, 0]^T$,其中 0 是为了在三维坐标系下计算方便所附加的平行于光束传播方向的偏振分量。假设反射平面 O_1O_2Q' 和 O_1O_2Q 之间的夹角为 θ ,输出光子的偏振态可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{is} \\ E_{ip} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_z(\theta) \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{R}_z(\theta)$ 为反射点前,入射光线由标准反射面 O_1O_2Q 上的偏振态表示到实际精跟踪反射面 O_1O_2Q' 上的光子偏振态表示的转换矩阵。根据菲涅耳公式,反射后的偏振态可以表示为

$$\begin{bmatrix} E'_{os} \\ E'_{op} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{sp} \begin{bmatrix} E_{is} \\ E_{ip} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{J}_{sp} 为反射镜的琼斯矩阵,当入射角为 θ_1 ,折射角为 θ_2 时, $r_s = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$, $r_p = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)}$ 。入射角与折射角关系为 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, n_1 和 n_2 为入射介质和反射介质的折射率。

从(2)式可以看出,反射光的偏振态主要受两个因素的影响:1)反射镜的偏振特性。这是由反射镜本身的物理属性所决定的。2)入射光偏振态在反射面坐标系下的表示,即入射光偏振态在反射面上 s 和 p 方向投影变化。这主要因为反射光方向的不不断变化而使得入射光偏振态在反射面 s 和 p 方向投影也随之变化。但是通常星上精跟踪变化幅度极小,为毫弧度量级。相比之下反射镜的偏振特性是影响偏振态的首要因素,图2为两者导致的偏振态变化角。

从图2可以看出,采用单反射镜结构的精跟踪系统对光子偏振态的影响极大,这对于强度调制的光通信系统来说影响不大。但是对于量子通信或者相干光通信来说是不得不考虑的一个重要因素。

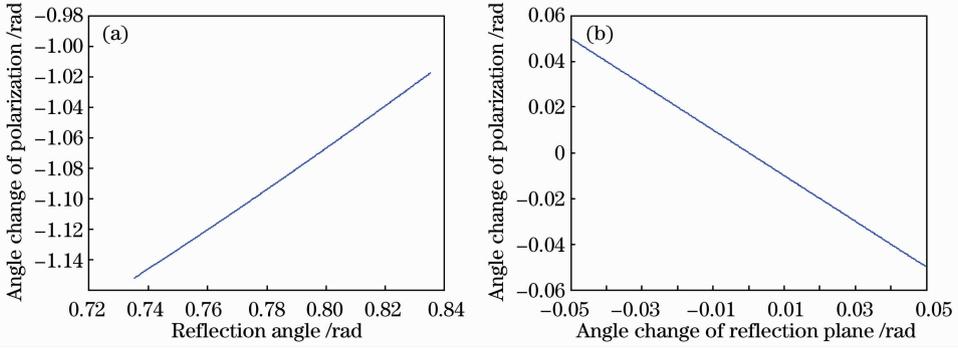


图2 反射镜偏振特性与反射面变化角对光子偏振态的影响

Fig. 2 Polarization influence of mirror and changing of reflecting surface

3 旋光-双反射结构

设计双反射镜光路如图3所示,利用两面反射镜实现光束 $\pi/2$ 的偏转。控制初始状态下两反射镜的入射角 $\theta_1 = \theta_2 = 3\pi/4$,并且使得两个反射面处于一个平面。两面反射镜分别能够以 m_1 点和 m_2 点为中心做二维转动。反射镜采用同一材料,所以折射率和折射角均相等,即 $n_1 = n_2, \varphi_1 = \varphi_2$ 。在 m_1 和 m_2 光路之间和 m_1 镜前各放置一个 $\pi/2$ 的磁致旋光晶体,

其琼斯矩阵表示为 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。

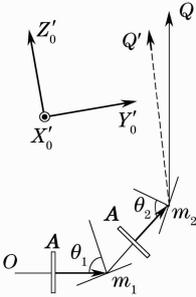


图3 旋光-双反射结构示意图

Fig. 3 Schematic drawing of magneto-optical crystal and two mirrors reflection structure

当需要改变出射光方向时,根据立体几何理论,设计两个反射镜的转动角度,使得入射角和反射平面时刻保持相等。这样能够尽量减少反射面变化角对偏振态的影响。此时出射光的偏振态可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{os} \\ E_{op} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{sp2} \mathbf{A} \mathbf{J}_{sp1} \mathbf{A} \mathbf{R}_Z(\phi) \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{p1} r_{s2} \cos \phi & r_{s1} r_{s2} \sin \phi & 0 \\ -r_{p1} r_{p2} \sin \phi & -r_{s1} r_{p2} \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中 ϕ 为精跟踪状态下反射平面与标准反射平面之间的夹角。当夹角 ϕ 较小时, $r_{s1} = r_{s2} = r_s, r_{p1} = r_{p2} = r_p, \phi \rightarrow 0$ 。出射光可写为

$$\begin{bmatrix} E_{os} \\ E_{op} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s r_p & 0 & 0 \\ 0 & -r_s r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \exp(i\rho) \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

从图4可以看出,旋光晶体-双反射镜结构对于偏振态的影响仅限于反射面变化角对偏振态的影响。而反射镜的偏振特性对光子偏振态的影响则被旋光晶体-双反射镜结构完全补偿了。

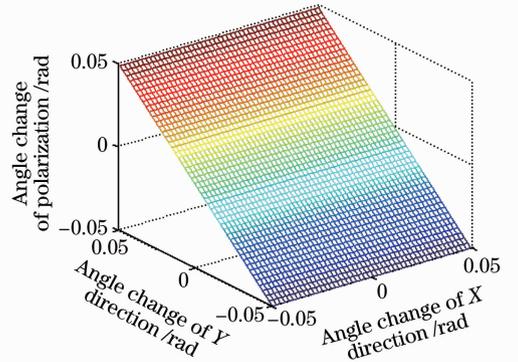


图4 旋光-双反射结构偏振变化

Fig. 4 Polarization changing of magneto-optical crystal and two mirrors reflection structure

4 实际系统中反射镜引起的误码率变化仿真

假设接收端能够完美地实现精跟踪,接收端偏振坐标系的 Z 轴与光束方向完全重合。此时Bob的偏振检测基与出射光偏振坐标系相同。设出射光右

手坐标系为 (X_0', Y_0', Z_0') , 如图 3 所示。其中 Z_0' 轴与光束方向相同, X_0' 轴方向垂直于反射面向外。将入射光和出射光偏振态写为态矢量形式

$$|\psi_{in}\rangle = \frac{E_s}{\sqrt{E_s^2 + E_p^2}} |0\rangle + \frac{E_p}{\sqrt{E_s^2 + E_p^2}} |1\rangle, \quad (5)$$

$$|\psi_{out}\rangle = \frac{E_{os}}{\sqrt{E_{os}^2 + E_{op}^2}} |0\rangle + \frac{E_{op}}{\sqrt{E_{os}^2 + E_{op}^2}} |1\rangle. \quad (6)$$

入射光投影算符可表示为

$$|\psi_{in}\rangle\langle\psi_{in}| = \left(\frac{E_s}{\sqrt{E_s^2 + E_p^2}} |0\rangle + \frac{E_p}{\sqrt{E_s^2 + E_p^2}} |1\rangle \right) \times \left(\frac{E_s}{\sqrt{E_s^2 + E_p^2}} \langle 0| + \frac{E_p}{\sqrt{E_s^2 + E_p^2}} \langle 1| \right). \quad (7)$$

出射光偏振态在入射光上的投影可表示为

$$|\psi\rangle = |\psi_{in}\rangle\langle\psi_{in}||\psi_{out}\rangle = \frac{E_{os}E_s + E_{op}E_p}{\sqrt{(E_{os}^2 + E_{op}^2)(E_s^2 + E_p^2)}} |\psi_{in}\rangle. \quad (8)$$

此时, 量子误码率为

$$p = 1 - \left[\frac{E_{os}E_s + E_{op}E_p}{\sqrt{(E_{os}^2 + E_{op}^2)(E_s^2 + E_p^2)}} \right]^2. \quad (9)$$

分别计算四个线偏振光 $(0^\circ, \pi/4, \pi/2, -\pi/4)$ 的量子误码率, 根据 BB84 协议中各偏振光出现概率

(假设每个偏振态出现概率相等) 计算出总的量子误码率, 结果如图 5 所示。单反射镜的精跟踪系统将引入 40% 左右的量子误码率, 而旋光-双反射结构引入的量子误码率最高仅 0.25%。单反射镜对水平和垂直线偏振光的改变较小, 而对其他角度的线偏振光的改变较大。因此单反射镜结构引入的量子误码率主要来源于 $\pm\pi/4$ 偏振态光子。而旋光-双反射镜结构能够完全补偿反射镜对光子偏振态的影响, 因此在 X, Y 方向偏转 0° 附近的量子误码率为 0。而反射面跟随精跟踪方向改变将引入一些误码。这点与理论分析的结果完全一致。

进一步仔细分析图 5 的仿真结果不难发现, 对于单反射镜而言, Y 方向的偏转对于偏振态的影响较大。这个现象可以从 (2) 式中得到解释, 由于 Y 方向的偏转将显著地改变入射角, 从而进一步改变反射镜的偏振特性 (即改变 r_p 和 r_s 的值)。而 X 方向的偏转对入射角的改变较小。对于旋光-双反射结构而言, X 方向的偏转是唯一能够改变反射平面的参数。因此旋光-双反射结构对偏振态的影响仅受 X 方向偏转的影响。在 X 方向偏转一定时, Y 方向的偏转对偏振态无影响。

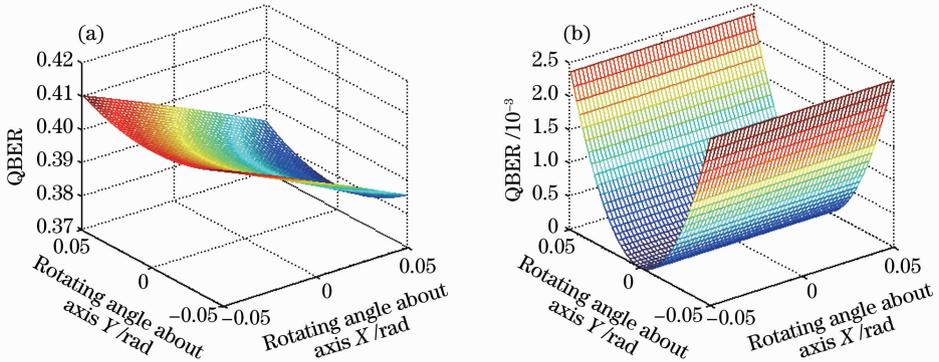


图 5 (a) 单反射镜和 (b) 旋光-双反射结构的量子误码率

Fig. 5 Quantum bit error rate of (a) single mirror reflection structure and (b) magneto-optical crystal and two mirrors reflection structure

5 结 论

旋光-双反射结构利用两面相同反射镜的偏振特性进行互补, 能够较为理想地补偿普通反射镜带来的偏振态变化。该结构对于偏振敏感的量子密钥分发系统而言能够最大限度地减少因反射镜引入的量子误码率。不仅是量子密钥分发, 一些偏振相关的星上光学系统均能够利用该反射结构对反射镜的偏振特性进行补偿。例如星载相干光通信系统和航天偏振遥感探测等。

参 考 文 献

- 1 N. R. Zhou, L. J. Wang, L. H. Gong *et al.*. Quantum deterministic key distribution protocols based on teleportation and entanglement swapping[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(19): 4836~4842
- 2 N. R. Zhou, L. J. Wang, J. Ding *et al.*. Quantum deterministic key distribution protocols based on the authenticated entanglement channel[J]. *Phys. Scripta*, 2010, **81**(4): 045009
- 3 Han Baobin, Pei Changxing, Liu Dan. Analysis of influence of magneto-optical effect on quantum key distribution system with phase coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3328~3331
- 韩宝彬, 裴昌幸, 刘丹. 磁光效应对量子相位编码系统的影响分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3328~3331

- 4 Peng Kunchi, Jia Xiaojun, Su Xiaolong *et al.*. Optical manipulations of quantum states with continuous variables[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900107
彭堃焯, 贾晓军, 苏晓龙等. 连续变量量子态的光学操控[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900107
- 5 Chen Shuai, Wang Jindong, Zhong Pingping *et al.*. Influence of time jitter on quantum bit error rate of phase-coding quantum key distribution system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0727001
陈帅, 王金东, 钟平平等. 时间抖动对相位编码量子密钥分发系统量子误码率的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0727001
- 6 M. Pfenigbauer, W. R. Leeb. Free-space optical quantum key distribution using intersatellite links [C]. CNES-Intersatellite Link Workshop, 2003. 1~9
- 7 I. Marcikic, A. L. Linares, C. Kurtsiefer. Free-space quantum key distribution with entangled photons[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(10): 101122
- 8 T. S. Manderbach, H. Weier, M. Fürst *et al.*. Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(1): 010504
- 9 P. Villoresi, T. Jennewein, F. Tamburini *et al.*. Experimental verification of the feasibility of a quantum channel between space and Earth[J]. *New J. Phys.*, 2008, **10**(3): 033038
- 10 R. Ursinetal, F. Tiefenbacher, T. S. Manderbach *et al.*. Entanglement-based quantum communication over 144 km[J]. *Nature Phys.*, 2007, **3**(7): 481~486
- 11 Z. L. Yuan, B. E. Kardynal, A. W. Sharpe *et al.*. High speed single photon detection in the near infrared[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(4): 041114
- 12 R. H. Hadfield, J. L. Habif, J. Schlafer *et al.*. Quantum key distribution at 1550 nm with twin superconducting single-photon detectors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(24): 241129
- 13 Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun *et al.*. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205008
张亮, 王建宇, 贾建军等. 基于CMOS的量子通信精跟踪系统设计及检验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205008
- 14 Cai Wenqi, Chen Tengyun, Liang Hao *et al.*. Development of synchronized laser discriminator in quantum key distribution system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 704~707
蔡文奇, 陈腾云, 梁昊等. 量子密钥分发系统中同步激光甄别器的研制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 704~707
- 15 J. M. Hilkert, D. L. Amil. Structural effects and techniques in precision pointing and tracking systems; a tutorial overview[C]. *SPIE*, 2010, **7696**: 76961C
- 16 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 1957. 28~30
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 1957. 28~30
- 17 Zhengping Wang, Jinhui Shi, Shunling Ruan. Designs of infrared non-polarizing beam splitters[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(2): 394~399
- 18 Gu Peifu, Zheng Zhenrong. Design of non-polarizing thin film edge filters[J]. *J. Zhejiang University: Science A*, 2006, **7**(6): 1037~1040
- 19 Xie Haiyan, Hu Hongzhang, Zhang Shengjia *et al.*. Study and fabrication of integrated optical polarization-independent reflector [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 691~694
谢海宴, 胡鸿璋, 张胜甲等. 偏振无关集成光学模反射镜的研制[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 691~694
- 20 Chen Ligang, Hong Jin, Qiao Yanli *et al.*. Simulation study on depolarization for imperfect orthogonal mirrors [J]. *Applied Optics*, 2008, **29**(4): 633~638
陈立刚, 洪津, 乔延利等. 非理想正交反射镜消偏性能的模拟研究[J]. *应用光学*, 2008, **29**(4): 633~638

栏目编辑:李文喆