

旋光-双反射结构的光子偏振态误差分析

赵顾颢¹ 赵尚弘¹ 么周石² 蒙文¹ 王翔¹ 朱子行¹ 刘丰²

(¹空军工程大学信息与导航学院, 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 旋光-双反射结构能够利用反射镜自身的偏振特性,配合旋光晶体实现光子偏振态的自动补偿,以减小移动量子密钥分发系统中反射镜引入的量子误码率。而该结构要求两面反射镜偏振特性完全相同,旋光晶体能够实现 90° 的完美旋光。从反射镜不匹配和旋光晶体旋转角度不准确两个方面对旋光双反射结构的误差进行了分析。研究结果显示,选择折射率相对大的反射镜,并且保证旋光晶体之间和反射镜之间的差异尽可能小,可以保证输出偏振态的稳定。

关键词 量子光学;偏振无关反射结构;偏振误差;量子误码率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0218001

Polarization Error Analysis of Rotatory Double Reflection Structure

Zhao Guhao¹ Zhao Shanghong¹ Yao Zhoushi² Meng Wen¹

Wang Xiang¹ Zhu Zhihang¹ Liu Feng²

(¹The Communication and Navigation 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 By using the polarization characteristics of reflection mirror and cooperating with magneto-optical crystals, the rotatory double reflection structure can automatically compensate the polarization of photons. The polarization independent reflection structure can be used in the movable quantum key distribution system. The structure requires the polarizations of two mirrors to be absolutely the same and the rotatory angles of magneto-optical crystals to accurately reach 90° . The polarization error caused by mirror mismatch and rotatory angles deviating from 90° is analyzed. The result shows that if the difference between two magneto-optical crystals and two mirrors is kept small enough, good stability of polarization of output pulse can be kept.

Key words quantum optics; polarization independence reflection structure; polarization error; quantum bit error rate

OCIS codes 270.5568; 230.2240; 230.5440

1 引言

从第一个量子密钥分发协议^[1]的提出到现在,经过近 30 年的发展,量子密钥技术已经非常成熟。在光纤和实际的光缆中已经有超过 200 km 的量子密钥分配系统^[2],商用化的终端和多用户网络^[3,4]也已经成熟,相应的系统安全性已经被充分研究^[5]。而在自由空间方面,144 km 的自由空间量子密钥分配^[6,7]和星地的单光子反射探测实验^[8]也已经实现。

这说明星载量子密钥分发已经在技术上没有障碍。然而卫星在轨运行期间,需要依靠跟瞄系统^[9,10]才能保证光束稳定指向接收端。而跟瞄系统中的反射镜对光子的偏振态有较大影响^[11]。文献^[12]中提出了一种旋光双反射结构,该结构在理论上能够对光子的偏振态进行完全补偿。要实现完美的偏振态补偿要求两面反射镜偏振特性完全相同,且旋光晶体的旋光角为 90° 。而在实际应用中器件往往无法十全

收稿日期: 2012-09-13; 收到修改稿日期: 2012-10-19

作者简介: 赵顾颢(1986—),男,博士研究生,主要从事卫星激光通信和量子密钥分发方面的研究。

E-mail: zghlupin@163.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光通信技术方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

十美。本文从反射镜不匹配和旋光晶体旋转角度不准确两个方面对旋光双反射结构的误差进行了分析。

2 两反射镜偏振特性相等,旋光晶体旋光角非 90°

从文献[12]的推导中可以看出,出射光偏振态主要由旋光晶体(A1,A2)的旋光特性和反射镜

(M1,M2)的偏振特性以及两次反射平面之间的夹角决定。由于在精跟踪过程中可以通过调整两面反射镜的反射角度来实现两次反射平面夹角为 0°,故不再讨论该因素的误差情况。

假设两面反射镜由相同材料构成,且偏振特性相同。而旋光晶体的旋光角不为 90°时,出射光偏振态表示为

$$\begin{bmatrix} E_{os} \\ E_{op} \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{sp} \mathbf{A}_\theta \mathbf{J}_{sp} \mathbf{A}_\rho \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & 0 \\ \sin \rho & \cos \rho & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_s^2 \cos \theta \cos \rho - r_s r_p \sin \theta \sin \rho) E_s - (r_s^2 \cos \theta \sin \rho + r_s r_p \cos \rho \sin \theta) E_p \\ (r_p^2 \cos \rho \sin \theta + r_s r_p \cos \theta \sin \rho) E_s + (r_p^2 \cos \theta \cos \rho - r_s r_p \sin \theta \sin \rho) E_p \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

根据文献[12]推导,出射光偏振态在入射光偏振态矢量上的投影可写为

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

定义偏振保持度为输出光偏振态在输入光偏振态矢量上的投影,即

$$n = \frac{E_{os} E_s + E_{op} E_p}{\sqrt{(E_{os}^2 + E_{op}^2)(E_s^2 + E_p^2)}}. \quad (3)$$

此时,偏振态变化引起的误码概率可写为

$$p = 1 - \left[\frac{E_{os} E_s + E_{op} E_p}{\sqrt{(E_{os}^2 + E_{op}^2)(E_s^2 + E_p^2)}} \right]^2. \quad (4)$$

图 1 为不同线偏振光经过晶体旋光角非 90°的旋光双反射结构的偏振保持度。仿真以折射率为 1.52 的玻璃为例,假设旋光晶体的旋光角在 90°±9°的范围内波动,由于反射镜对不同偏振光的偏振态影响不同,因此当旋光晶体的旋光角非 90°时,旋光双反射结构对不同偏振态入射光的影响各不相

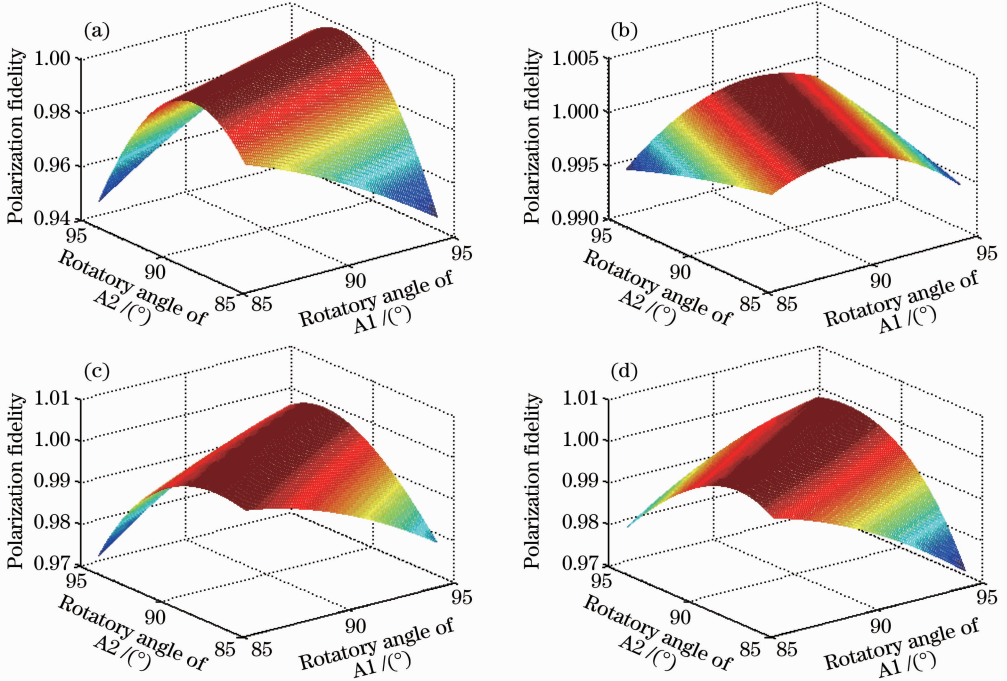


图 1 不同线偏振光经过旋光角非 90°的旋光-双反射结构时的偏振保持度。(a) 0°; (b) 90°; (c) 45°; (d) -45°

Fig. 1 Fidelities of different linearly polarized light after crystal with rotatory double reflection structure when the rotatory angle is not 90°. (a) 0°; (b) 90°; (c) 45°; (d) -45°

同。其中 90° 偏振光经过第一个旋光晶体后偏振态转为 0° 左右,而反射镜对 0° 线偏振光的影响变化最小。因此从仿真中可以看出 90° 入射光的偏振态保持度最高, 45° 和 -45° 偏振光保持度次之, 0° 偏振光的保持度最差。对于相同角偏差下单个偏振态入射光而言,旋光角大于 90° 的晶体比旋光角小于 90° 的晶体对偏振态的影响更大。且当两个晶体旋光角相近时偏振态的保持度趋近于 1。因此,若旋光晶体

无法稳定工作在 90° ,只要保证两个旋光角的旋光角相等即可最大程度保证输出光偏振态稳定。

3 两旋光晶体旋光角同为 90° ,两反射镜偏振特性不同

假设两个旋光晶体旋光角同为 90° ,但是反射镜的折射率不完全相同。根据(1)式,此时出射光的偏振态可以表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{os} \\ E_{op} \\ 0 \end{bmatrix} &= \mathbf{J}_{sp1} \mathbf{A} \mathbf{J}_{sp2} \mathbf{A} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & r_{p1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & r_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} -r_{s1} r_{p2} E_s \\ -r_{s2} r_{p1} E_p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin(\theta_{11} - \theta_{12})}{\sin(\theta_{11} + \theta_{12})} \frac{\tan(\theta_{21} - \theta_{22})}{\tan(\theta_{21} + \theta_{22})} E_s \\ \frac{\sin(\theta_{21} - \theta_{22})}{\sin(\theta_{21} + \theta_{22})} \frac{\tan(\theta_{11} - \theta_{12})}{\tan(\theta_{11} + \theta_{12})} E_p \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

从(5)式不难看出,当入射光为水平或垂直偏振态,即 E_s 或 E_p 为 0 时,出射光的偏振态完全没有影响,当入射光为 $\pm 45^\circ$ 偏振态时,出射光的偏振态变化较大,并且 $+45^\circ$ 与 -45° 偏振出射光偏振态完全相同。同样以玻璃介质作为仿真对象,取反射镜的折射率 1.52 ± 0.152 ,图 2 为 0° 及 $\pm 45^\circ$ 线偏振光经

过反射结构以后的偏振态变化情况。与公式的推导结论相同,两面反射镜折射率之差越小,出射光的偏振态变化越小。同时,从图 2(a)中前尖后宽的图形结构可以看出,如果采用折射率值大的反射材料,两个反射镜的折射率差异相对会更小。

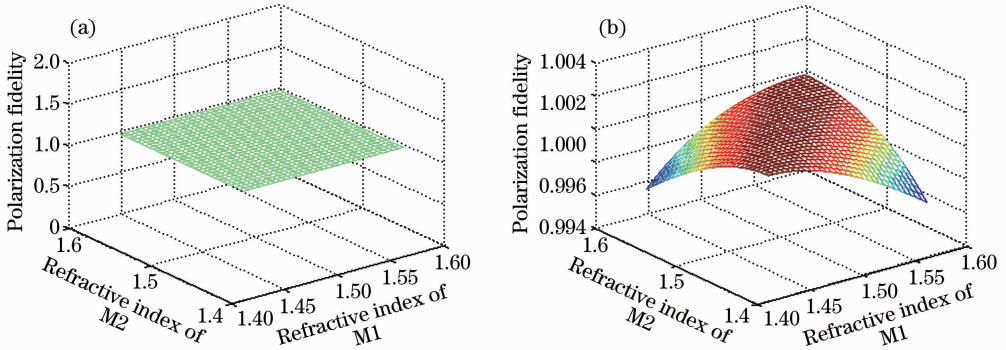


图 2 (a) 0° 和 (b) $\pm 45^\circ$ 线偏振光经过反射镜不匹配旋光-双反射结构的晶体时的偏振保持度

Fig. 2 Fidelity of different linear polarized light after crystal with rotatory double reflection structure when the mirrors do not match. (a) 0° ; (b) $\pm 45^\circ$

以 BB84 协议为例,图 3 为当 4 个线偏振光的出现概率相等时,系统分别经过旋光晶体和反射镜有缺陷的旋光双反射结构后的量子误码率(QBER)情况,其中每种缺陷的误差率不超过 10%。从图中可以看出当两个器件的误差率小于 5%时,旋光晶体的误差引入的量子误码率小于 5%,而反射镜的误差引入的量子误码率在 0.5% 以下。由此可以看出旋光晶体的误差给系统带来的量子误码率相对于

反射镜的误差引入的更大。因此,在该反射结构的搭建中需要更加注意旋光晶体的选择。

4 结 论

对旋光-双反射结构在器件存在缺陷时的偏振误差及相应的系统量子误码率进行了研究。研究发现,虽然实际系统的器件不可避免地有各种缺陷,以致无法达到反射结构设计所提出的要求,但是

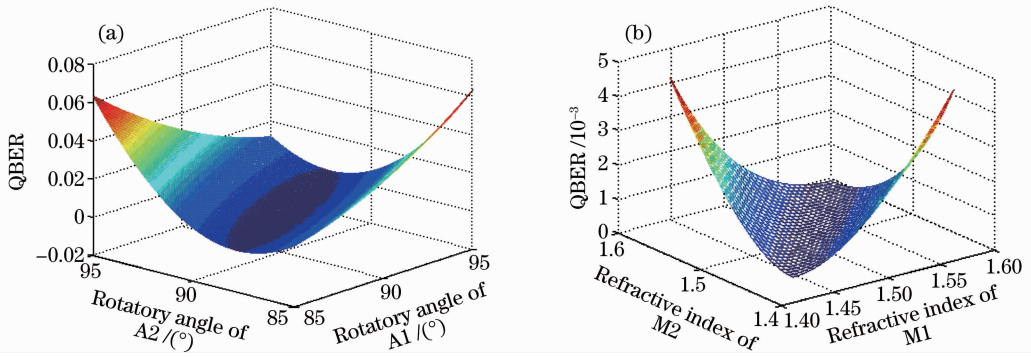


图 3 经过(a)旋光晶体和(b)反射镜有缺陷的旋光-双反射结构后的量子误码率

Fig. 3 QBER of defective rotatory double reflection structure introduced by defects in (a) magneto-optical crystal and (b) mirror reflector

只要采用相对折射率大的反射镜,并且使两个旋光晶体和两个反射镜之间的差异尽量小,即可使得出射光的偏振态改变最小,引入的误码率较小。

参 考 文 献

1 C. H. Bennett, G. Brassard. Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing[C]. IEEE International Conference on Computers, Systems & Signal Processing, 1984. 175~179
 2 Shuang Wang, Wei Chen, Junfu Guo *et al.*. 2 GHz clock quantum key distribution over 260 km of standard telecom fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(8): 1008
 3 X. F. Mo, B. Zhu, Z. F. Han *et al.*. Faraday-Michelson system for quantum cryptography[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2632~2634
 4 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
 5 Shihai Sun, Musheng Jiang, Linmei Liang. Passive Faraday-mirror attack in a practical two-way quantum-key-distribution system[J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(6): 062331
 6 R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Schmitt-Manderbach *et al.*. Entanglement-based quantum communication over 144 km[J]. *Nature Phys.*, 2007, **3**(6): 481~486

7 T. Schmitt-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
 8 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
 9 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 的量子通信跟踪系统设计及检验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205008
 10 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
 11 L. D. Travis. Remote sensing of aerosols with the earth observing scanning polarimeter [C]. *SPIE*, 1992, **1747**: 154~164
 12 Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi *et al.*. Fine tracking mirror in satellite-based quantum key distribution based on magneto-optical crystal and two mirrors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1018001
 赵顾颢, 赵尚弘, 么周石 等. 基于旋光-双反射结构的星载量子密钥系统精跟踪镜研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(10): 1018001

栏目编辑:李文喆